



Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## **INGENIERÍA EN GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA**

### **TRABAJO DE FINAL DE GRADO**

# **MODELADO TRIDIMENSIONAL DE LA ERMITA DE LA SALUT EN EL MUNICIPIO DE EL PAPIOL**

**Proyectista:** Javier Muniente Castro

**Director:** Felipe Buill Pozuelo

**Convocatoria:** Enero-Febrero 2016



## RESUMEN

La *Ermita de la Salut* está protegida como bien cultural de interés local. Construcciones de esta índole están ligadas al colectivo humano, dándole identidad, origen y continuidad a nuestros pueblos. Es por ello que nace la necesidad de preservación del patrimonio para conservarlo y/o restaurarlo si hiciera falta.

El presente proyecto explica los pasos a seguir para obtener el modelo tridimensional del elemento patrimonial en cuestión, así como el fundamento teórico, de los algoritmos aplicados por el sistema fotogramétrico, para obtener dicho modelo.

La fotogrametría apoyada desde dron, en aplicación a objetos próximos, ha sido la metodología empleada para llevar a cabo el levantamiento. Además, la óptica de la cámara utilizada para la toma fotográfica ha sido del tipo ultra-gran-angular, lo que provoca grandes distorsiones en las imágenes, y dificulta el procesado para obtener el modelo con exactitud y precisión.

El resultado final del proceso fotogramétrico ha sido el modelo tridimensional, a partir de cual se ha obtenido las ortofotografías de las cuatro fachadas y de la planta a escala 1:50 (escala real), así como cuatro isometrías del elemento patrimonial, pudiendo visualizar la ermita desde distintos puntos de vista.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	3
1. <b>INTRODUCCIÓN</b> .....	9
1.1 MOTIVACIÓN .....	9
1.2 OBJETIVO.....	10
2. <b>METODOLOGÍA ELEGIDA</b> .....	11
2.1 MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO.....	11
2.1.1 Sistemas simples .....	11
2.1.2 Métodos topográficos.....	11
2.1.3 Técnicas fotogramétricas.....	12
2.2 JUSTIFICACIÓN.....	12
3. <b>ELEMENTO PATRIMONIAL</b> .....	13
3.1 LOCALIZACIÓN .....	13
3.2 LA HISTORIA .....	15
3.3 LA EDIFICACIÓN .....	16
4. <b>TOPOGRAFÍA CLÁSICA</b> .....	17
4.1 DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO .....	17
4.2 RED DE CONTROL TOPOGRÁFICA.....	20
4.2.1 Instrumentación.....	20
4.2.2 Tolerancia planimétrica.....	21
4.2.3 Obtención de las coordenadas aproximadas.....	22
4.2.4 Compensación rigurosa .....	23
4.2.5 Elipses de error.....	24
4.3 NIVELACIÓN GEOMÉTRICA .....	25
4.4 RADIACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO Y CONTROL .....	28
5. <b>FOTOGRAMETRÍA DIGITAL</b> .....	29
5.1 INSTRUMENTACIÓN .....	29
5.1.1 Cuadricóptero .....	29
5.1.2 Cámara fotográfica.....	30
5.1.3 Software .....	30

5.1.4	Hardware .....	31
5.2	TOMA FOTOGRÁFICA AÉREA.....	31
5.2.1	Plan de vuelo .....	32
5.2.2	Altura de vuelo .....	32
5.2.3	Recubrimiento .....	34
5.3	MODELADO TRIDIMENSIONAL.....	35
5.3.1	Imágenes.....	36
5.3.2	Detección de características .....	37
5.3.3	Establecimiento de correspondencias.....	37
5.3.4	Aéreotriangulación .....	38
5.3.5	Ajuste en bloque (Bundle adjustment) .....	41
5.3.6	Densificación de la nube de puntos.....	42
5.3.7	Eliminación de puntos erróneos .....	42
5.3.8	Creación de la malla .....	43
5.3.9	Texturizado.....	43
6.	CONCLUSIONES.....	45
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	47
8.	AGRADECIMIENTOS.....	49
9.	CONTENIDO DEL CD-ROM.....	51
10.	PLANOS .....	53
11.	ANEXOS.....	67
11.1	RESEÑAS .....	69
11.2	INFORME DE CALIDAD DEL MODELO 3D.....	81
11.3	PROCEDIMIENTO DE TRABAJO CON EL SOFTWARE PIX4D MAPPER.....	92
11.4	ADICIÓN DE PUNTOS DE APOYO Y CONTROL .....	100
11.5	ANÁLISIS DEL INFORME DE CALIDAD.....	104
11.6	CONFIGURACIÓN DE LAS OPCIONES DEL PROCESADO.....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa topográfico de Barcelona a escala 1:400000. Modificado de ICGC.....	13
Figura 2. Ortofotografía a escala 1:10.000. Modificado de ICGC.....	14
Figura 3. Virgen de la Salut .....	15
Figura 4. Imagen aérea de la ermita sin distorsión.....	16
Figura 5. Distribución de los puntos de poligonal (apoyo) .....	17
Figura 6. Diana en el punto PA-1.....	17
Figura 7. Constelación GPS .....	18
Figura 8. Vectores desde las estaciones permanentes hasta los puntos PA-1 y PA-2.....	19
Figura 9. Estación total Leica TS06PLUS - ULTRA 3" .....	20
Figura 10. Nivel de burbuja partida .....	25
Figura 11. Método de las estaciones equidistantes 1.....	26
Figura 12. Método de las estaciones equidistantes 2.....	27
Figura 13. Radiación punto de control.....	28
Figura 14. Cuadricóptero Phantom 2 .....	29
Figura 15. Go Pro Hero 3 Silver Edition.....	30
Figura 16. Plan de adquisición de las imágenes.....	32
Figura 17. Altura de vuelo.....	33
Figura 18. Recubrimiento.....	34
Figura 19. Algoritmo SfM (Structure from motion) .....	35
Figura 20. Imagen "G0013446" con distorsión.....	36
Figura 21. Imagen "G0013446" sin distorsión.....	36
Figura 23. Descriptores de puntos.....	37
Figura 22. Puntos de interés .....	37
Figura 24. Damero .....	38
Figura 25. Parámetros intrínsecos de una cámara .....	39
Figura 26. Parámetros extrínsecos .....	40
Figura 27. Ajuste en bloque .....	41
Figura 28. Nube de puntos densificada (9030981 puntos).....	42
Figura 29. Eliminación de puntos erróneos.....	42
Figura 30. Malla de triángulos monocolor .....	43
Figura 31. Textura.....	43
Figura 32. Modelo 3D texturizado .....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas absolutas en el sistema de referencia ETRS89 y proyección UTM 31N.	19
Tabla 2. Características técnicas de la estación total y del prisma circular.....	21
Tabla 3. Tipos de error y tolerancias.....	21
Tabla 4. Cálculo coordenadas aproximadas .....	22
Tabla 5. Errores de cierre y tolerancias .....	22
Tabla 6. Elipses de error.....	24





## 1. INTRODUCCIÓN

El levantamiento arquitectónico tiene como finalidad primordial el conocimiento integral del objeto arquitectónico, no sólo en su materialidad física, sino en todo lo que le concierne como pueda ser su historia y su significado (Almagro, 2004). El presente proyecto no pretende profundizar en el aspecto histórico, sino en la obtención de un modelo tridimensional fiel a la realidad del bien patrimonial y su representación gráfica.

### 1.1 MOTIVACIÓN

El principal motivo que me impulsó a realizar este proyecto fue el interés generado en el desarrollo de la práctica de generación de un modelo tridimensional arquitectónico a partir de imágenes mediante fotogrametría realizada en la asignatura *Levantamientos no cartográficos* cursada en el grado.

Otro de los factores que influyó en la elección del tema del proyecto, fue el auge que están teniendo los vehículos aéreos no tripulados, en muchos campos de investigación, y en especial en la fotogrametría.

Esto me llevo a adquirir un cuadricóptero de gama baja, al cual podía incorporar una cámara liviana de campo ancho.

Solo faltaba decidir, sobre que elemento realizar el estudio. El tutor del proyecto me ofreció hacerlo sobre una ermita románica y pensé que sería una buena idea, ya que tenía el instrumental adecuado para poder hacer el levantamiento sin intervenir directamente con la construcción, muy importante en este tipo de trabajos, para conservar el patrimonio. Además, al poder hacer la toma fotográfica aérea, tenía la posibilidad de hacer el levantamiento exterior de la totalidad de la iglesia, incluyendo la cubierta.

## 1.2 OBJETIVO

Obtener un modelo tridimensional de la ermita de la Salut situada ubicada en la sierra de Collserola cerca del Puig Madrona, en el municipio de El Papiol, que está protegida como bien cultural de interés local.

Se desarrollará como trabajo base para el levantamiento una red de control topográfico alrededor de la iglesia (apoyada con observaciones GNSS) desde la cual se realizará una poligonal de apoyo. El itinerario servirá para todo el trabajo fotogramétrico y topográfico de la zona.

La toma fotográfica se efectuará desde una plataforma no tripulada (dron), para después orientar el bloque fotogramétrico y finalmente obtener el modelo 3D del elemento patrimonial.

Como productos derivados se obtendrán ortofotografías a escala 1/50 de las cuatro fachadas y un plano de planta. En la memoria se presenta una reducción de escala a 1/100, por motivos de tamaño del papel utilizado en la memoria (DIN-A4). Por otro lado, también se han obtenido cuatro isometrías a escala 1:300 (escala de impresión).

La cobertura fotográfica se realizará con una cámara estándar de pequeño tamaño y peso (GoPro Hero 3+, con óptica estándar y de campo ultra-gran-angular), desde una plataforma no tripulada (dron).

El sistema fotogramétrico utilizado (Pix4D mapper), a partir de las imágenes obtenidas identificará puntos homólogos en las zonas en común (solape) entre dichas imágenes, para después proyectar los puntos en tres dimensiones generando la malla de triángulos, que a su vez dará forma al modelo tridimensional.

## **2. METODOLOGÍA ELEGIDA**

### **2.1 MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO**

El método utilizado en el levantamiento arquitectónico puede ser diverso. Podemos distinguir tres sistemas bien diferenciados según la complejidad del instrumental utilizado. El primero sería el que abarca las técnicas y aparatos más sencillos, y utilizados de forma directa sobre el objeto a medir. En segundo lugar estarían los métodos y técnicas topográficas, y en tercer lugar los métodos que utilizan como documento base la fotografía (Buill et al., 2007).

#### **2.1.1 Sistemas simples**

Los instrumentos más simples en el ámbito de la topografía, y en el de la construcción en general, integran éste conjunto. Instrumentos como el flexómetro son usados para la medición de distancias cortas, para distancias mayores se usa la cinta métrica. La plomada se utiliza para medir la verticalidad, el nivel de burbuja también es útil, incluso puede determinar la horizontalidad. Dentro de éste grupo también podemos distinguir dos tipos: el levantamiento directo y el diferido. Mientras que el directo puede ser un simple croquis realizado in situ, el segundo se completa en la oficina con los datos tomados en el lugar del levantamiento.

#### **2.1.2 Métodos topográficos**

En este grupo también tenemos diversos instrumentos, como por ejemplo el teodolito o el taquímetro, capaces de medir ángulos y distancias. Con la aparición de la distancimetría electro-óptica y la informática, al taquímetro se le han incorporado programas para que su uso sea más cómodo, llamándose así, estación total. Si la estación total dispone de medidor láser será muy útil en el levantamiento arquitectónico ya que no hará falta intervenir directamente con el elemento. También es posible utilizar sistemas para la obtención masiva de puntos como el láser escáner terrestre, capaz de tomar millones de puntos en pocos segundos.

### **2.1.3 Técnicas fotogramétricas**

En función de los datos a representar, en un levantamiento en tres dimensiones se utilizan métodos fotogramétricos monoscópicos, estereofotogramétricos o rectificación encadenada. Si nos referimos a los instrumentos según reconstrucción hay tres grupos: analógicos, analíticos y digitales. Tanto los analógicos como los analíticos están en desuso. Actualmente se utilizan sistemas fotogramétricos digitales que incluyen todos los elementos necesarios tanto a nivel de software como de hardware. Dependiendo desde que plataforma se obtienen las imágenes, la fotogrametría se puede clasificar en: espacial, aérea, terrestre o de objeto cercano.

## **2.2 JUSTIFICACIÓN**

Según el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS) la fotogrametría ofrece la solución inmediata, óptima y generalmente única a los problemas que presenta un levantamiento de ésta índole.

El método utilizado ha sido el levantamiento por fotogrametría efectuada desde dron, en aplicación a objetos próximos.

No obstante, hay que destacar otras técnicas, imprescindibles para poder determinar con precisión y exactitud el modelo. Por ejemplo, se han utilizado sistemas simples, el croquis y el flexómetro para reflejar los puntos de control in situ. También ha sido necesario emplear métodos topográficos, con la estación total y el nivel de línea para calcular una pequeña poligonal alrededor de la ermita, que han permitido dar coordenadas tridimensionales a todos los puntos del levantamiento.

### 3. ELEMENTO PATRIMONIAL

#### 3.1 LOCALIZACIÓN

La iglesia se ubica en el municipio de *El Papiol*, en la comarca del *Baix Llobregat*, que se extiende entre las últimas estribaciones de la *Sierra de Collserola*, el río *Llobregat* y la riera de *Rubí*.

Su origen histórico documentado se sitúa en el año 1060 en un pergamino del archivo capitular de la sede de Barcelona, que -entre otros parroquias- cita la actual ermita bajo el nombre de "*parroquia de Santa Madrona*".

El antiguo pueblo se formó sobre un cerro de 160 metros de altura alrededor del castillo, que se encuentra documentado desde el 1115.



Figura 1. Mapa topográfico de Barcelona a escala 1:400000. Modificado de ICGC.

Más concretamente, está situada junto al *Puig Madrona*, una cima a 340.6 metros sobre el nivel del mar, a una latitud de 41.44929 N y longitud 2.025278 E (WGS84). Para llegar hasta la ermita, hay varias posibilidades, una de ellas es por el camino de *Can Esteve de la Font* (El Papiol), y en el cruce con coordenadas 41.442877 N, 2.015273 E (WGS84) acceder a pie a la senda que lleva hasta la ermita, como se muestra en la siguiente ortofotografía (Figura 2).



Figura 2. Ortofotografía a escala 1:10.000. Modificado de ICGC.



### 3.2 LA HISTORIA

Fue parroquia hasta el s. XIV (1323-1333), cuando se construyó un templo nuevo cerca del Castillo de El Papiol, alrededor del cual se sitúa la nueva Villa.

La nueva iglesia parroquial tomará el nombre de *Santa Eulàlia*, y la actual ermita pierde la advocación de *Santa Eulàlia de Madrona* para denominarse capilla de *Sant Pere de Madrona*.

Cuatro siglos después -el 1717- el obispo de Barcelona Diego de Astorga fue quien sugirió el cambio de la advocación por la de *Verge de la Salut* (Figura 3) que se ha conservado hasta hoy.

Después de la restauración hecha el 1911, siendo rector Mn. Josep Rull, fue saqueada durante la guerra civil española –sin que resultara afectada la edificación-.

La última intervención la hizo la Diputación de Barcelona, que acabó la intervención en 1973, consolidando la edificación, derribando las construcciones adosadas –como la casa de la ermita- y dejándola con el aspecto actual.



Figura 3. Virgen de la Salut

### 3.3 LA EDIFICACIÓN

Se trata de una iglesia de una sola nave (Figura 4) de 20.54 m de largo por 3.50 m de ancho en su interior.

La nave, junto con el presbiterio, ábside y los absidiolos dibujan una planta de cruz latina.

A poniente está la construcción más antigua –prerrománica (s. IX-X)- que llega hasta media iglesia, donde está el campanario de espadaña. El resto es románico (s. XI).

El portal –de construcción más tardía- es de bóveda de cañón elíptica y justifica los tres arcos torales y la doble pared construida en el interior. Anteriormente tenía un techo envigado seguramente cubierto de piedras de pizarra.

De las ventanas, la más interesante es la de la fachada de poniente, geminada con un capitel de hojas de acanto sobre una pequeña columna, de las que se conservan pocas en la arquitectura prerrománica.

El altar, situado en el centro de la cruz latina, es de piedra y orientado hacia el oeste, y obedece a la reconstrucción del año 1972 siguiendo las normas conciliares vigentes.



Figura 4. Imagen aérea de la ermita sin distorsión.



## 4. TOPOGRAFÍA CLÁSICA

### 4.1 DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO

Rodeando la ermita se colocan de manera homogénea los puntos de poligonal (apoyo), de modo que, desde estos puntos o desde la línea que los une, se pueda colocar la estación total, para radiar los puntos de apoyo y control.

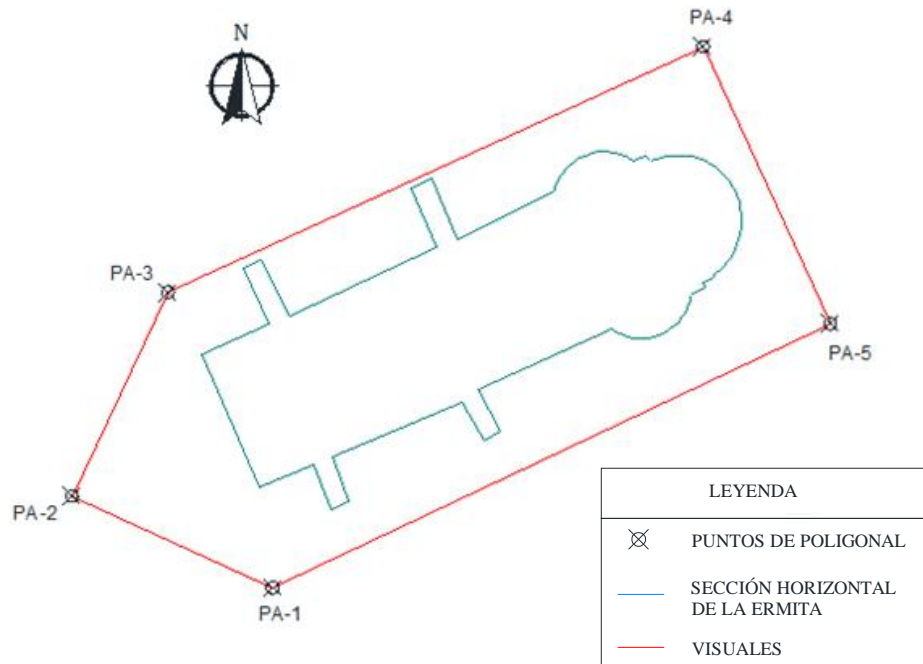


Figura 5. Distribución de los puntos de poligonal (apoyo)

Dichos puntos, se han materializado en campo con un tornillo de veinte centímetros de longitud, roscado sobre un taco, habiendo perforado previamente con un taladro. De esta manera, posteriormente aprovecharemos estos puntos para colocar las dianas (Figura 6) que usaremos para georreferenciar el modelo.



Figura 6. Diana en el punto PA-1

Para obtener coordenadas absolutas de al menos dos de los cinco puntos de apoyo (PA-1 y PA-2), hemos optado por realizar observaciones GNSS mediante un receptor GPS de la casa Leica, que hemos colocado en los puntos de apoyo, en épocas distintas, haciendo el cálculo independiente para cada uno de ellos. Esto ha sido posible gracias a las estaciones permanentes que conforman la red CATNet, que recogen constantemente datos de la constelación GPS (Figura 7).

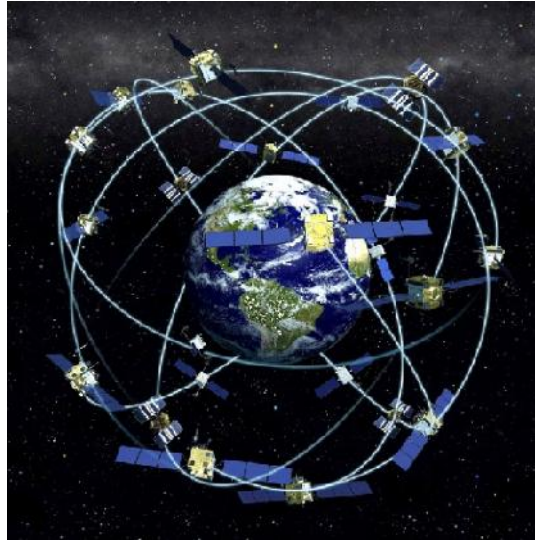


Figura 7. Constelación GPS

La manera en que obtenemos las coordenadas es calculando el vector satélite-receptor o pseudodistancia, mediante el desfase de las señales recibidas, a partir del tiempo de vuelo de la señal multiplicado por la velocidad de la luz. El tiempo de vuelo de la señal se obtiene mediante el alineamiento del código PRN generado por el receptor y el idéntico emitido por el satélite. A continuación se muestra el modelado de la fase:

$$\varphi_R^S(t) = \varphi^S(t) - \varphi_R(t) - N_R^S(1) + I(t) + T(t) + d_R(t) + d^S(t) + d_R^S(t) + \varepsilon$$

Dónde:

$\varphi^S(t)$	Fase del oscilador del receptor
$\varphi_R(t)$	Fase recibida del satélite
$N_R^S(1)$	Ambigüedad inicial
$I(t)$	Efecto ionosférico
$T(t)$	Efecto troposférico
$d_R(t)$	Ruido del receptor
$d^S(t)$	Ruido del satélite
$d_R^S(t)$	Multipath
	Ruido aleatorio de medida

Existen una serie de errores que se añaden al desfase, para eliminarlos es necesario hacer una combinación lineal entre L1 y L2. Estas combinaciones se denominan simples, dobles y triples diferencias.

Por otro lado, la periodicidad en el registro de los datos ha sido de un segundo y posteriormente el post proceso se ha realizado con el software Leica Geo Office. Para calcular los vectores (Figura 8), se han considerado como referencia las estaciones permanentes de las *Planes* y del *Garraf*.

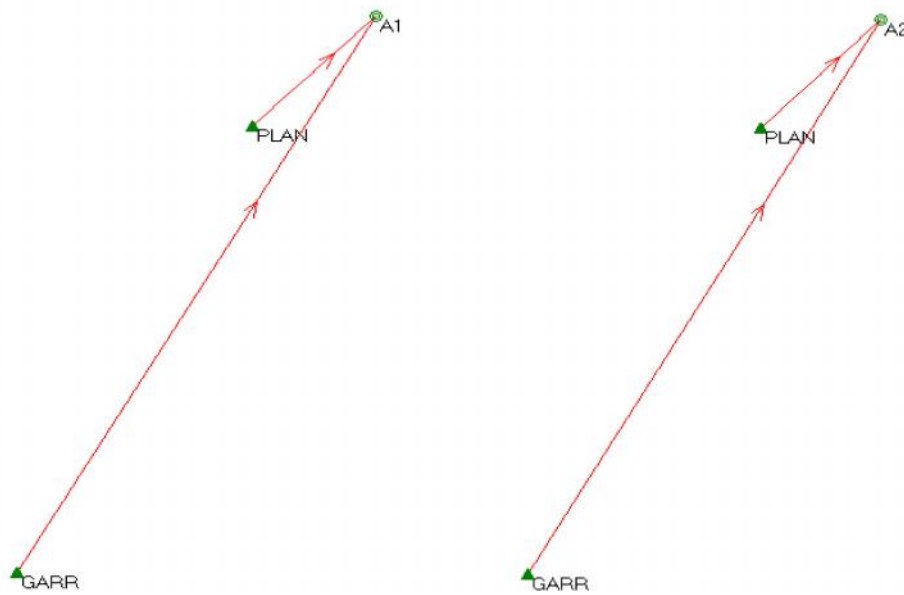


Figura 8. Vectores desde las estaciones permanentes hasta los puntos PA-1 y PA-2

El sistema de referencia utilizado ha sido el ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) y el geoide de referencia para obtener así las alturas ortométricas el EGM08D595.

Las ambigüedades han sido resueltas y los errores han entrado dentro de la tolerancia, obteniendo así las siguientes coordenadas UTM.

Id de punto	Clase de punto	Fecha/Hora	X utm	Y utm	Alt. Elip.	Alt. Ortom.	Ond. Geoidal	Pos. + Q Alt.
GARR	Control	01/10/2015 9:59	409073.5783	4571845.4413	634.4900	585.1294	49	0.0000
PLAN	Control	01/10/2015 9:59	415341.7397	4585714.1266	319.9661	270.5949	49	0.0000
<b>A1</b>	<b>Promediado</b>	<b>01/10/2015 10:20</b>	<b>418600.5272</b>	<b>4589093.3129</b>	<b>304.6598</b>	<b>255.3118</b>	<b>49</b>	<b>0.0106</b>
<b>A2</b>	<b>Promediado</b>	<b>01/11/2015 11:52</b>	<b>418577.8450</b>	<b>4589082.5894</b>	<b>304.7750</b>	<b>255.4270</b>	<b>49</b>	<b>0.0135</b>

Tabla 1. Coordenadas absolutas en el sistema de referencia ETRS89 y proyección UTM 31N

## 4.2 RED DE CONTROL TOPOGRÁFICA

Para dar consistencia a la red de control hay que ligar los puntos de poligonal mediante medidas angulares y distanciométricas. Posteriormente, desde los puntos de poligonal es posible radiar perfectamente los puntos de apoyo para comprobar el modelo fotogramétrico.

El error angular se comprueba sobre el mismo acimut formado por los dos puntos conocidos (PA-1, PA-5), por lo tanto se trata de una poligonal cerrada. Se pretende obtener coordenadas precisas de los tres puntos restantes (PA-2, PA-3, PA-4) que conforman la red topográfica y no hemos apoyado con observaciones GNSS.

El itinerario tiene una longitud total de 79.552 metros, está formado por 5 ejes con una longitud promedio de 15.91 metros.

### 4.2.1 Instrumentación

Las observaciones se han realizado con una estación total Leica TS06PLUS – ULTRA 3", recogiendo así los datos necesarios, ángulos que conforman las visuales a los puntos anterior y posterior, así como las distancias a ambos, mediante mediciones directas y reciprocas utilizando la regla Bessel, para eliminar los posibles errores sistemáticos que pueda tener el instrumento. Los datos se encuentran en el estadillo que se puede encontrar en las tablas Excel del archivo "MMCC" adjunto en el CD-ROM.



Figura 9. Estación total Leica TS06PLUS - ULTRA 3"

Es muy importante tener las características de los instrumentos utilizados, ya que son necesarias para los cálculos. Por un lado tenemos las de la estación total, y por otro, las del prisma incorporado en el jalón que hemos utilizado para realizar las diferentes observaciones.

ESTACIÓN LEICA TS06PLUS - ULTRA 3"		
Apreciación:	$a = 10$	[cc]
Aumentos antejo:	$A = 30$	[X]
Sensibilidad nivel elei	$s = 2$	['']
Precisión en distanci	$x = 1.5$	[mm]
	$y = 2$	[mm/Km]

PRISMA CIRCULAR LEICA GPR1		
Constante del prisma	$k = 0$	[mm]
Sensibilidad nivel esfi	$s' = 8$	['']

Tabla 2. Características técnicas de la estación total y del prisma circular

#### 4.2.2 Tolerancia planimétrica

La tolerancia es la precisión teórica alcanzable para asegurar un resultado aceptable. Dependiendo de las características de los instrumentos y del itinerario, la tolerancia será estricta o por lo contrario, amplia. Dependerá de los errores. Se puede distinguir la tolerancia angular de la tolerancia en coordenadas.

Existen varios errores que afectan transversalmente como longitudinalmente, estos son: de verticalidad, de puntería, de lectura y el de dirección, éste último dependerá del error de estación y de señal.

PRECISIÓN TEÓRICA ALCANZABLE		
Error de verticalidad:	$E_v = 0.51$	[cc]
Error de puntería:	$E_p = 1.60$	[cc]
Error de lectura:	$E_l = 7.07$	[cc]
Error de dirección:	$E_d = 122$	[cc]
Error de estación:	$E_e = 0.000$	[m]
Error de señal:	$E_s = 0.003$	[m]
Error angular (prom.)	$E_a = 122$	[cc]
Error transversal:	$E_t = 0.032$	[m]
Error longitudinal:	$E_L = 0.005$	[m]
<b>Tolerancia angular:</b>	$T(a) = 0.039$	[gon]
<b>Tolerancia en coord</b>	$T(x,y) = 0.032$	[m]

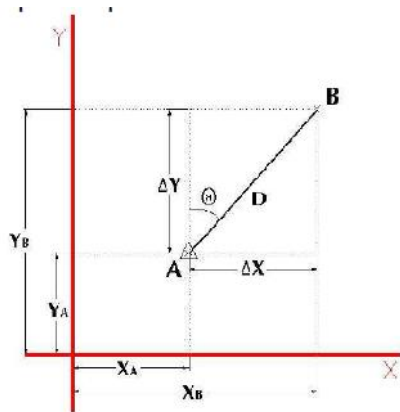
Tabla 3. Tipos de error y tolerancias

### 4.2.3 Obtención de las coordenadas aproximadas

Para obtener las coordenadas aproximadas hay que realizar una serie de cálculos: partiendo de las lecturas (observaciones), obtenemos los ángulos entre los puntos de poligonal, éstos se refieren al origen (ya que no hemos orientado la estación en campo). Posteriormente los ángulos se refieren al acimut formado entre los dos puntos conocidos (PA-1 y PA-5), obteniendo así el acimut de los diferentes ejes. Finalmente se obtienen las coordenadas aproximadas por trigonometría.

Eje	Lec. Dir. [gon]	Lec. Rec. [gon]	Ref. Orig. [gon]	Acimut [gon]	Dr [m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$X'$ [m]	$Y'$ [m]	Punto
PA1-PA5	103.3832	-	103.3832	71.8851	25.142	-	-	418577.845	4589082.589	PA1
PA1-PA2	358.7853	123.5260	358.7853	327.2871	8.971	-8.159	3.728	418569.686	4589086.32	PA2'
PA2-PA3	24.3071	126.4030	59.5664	28.0683	9.134	3.898	8.261	418573.584	4589094.58	PA3'
PA3-PA4	370.9879	228.4503	104.1513	72.6531	23.932	21.758	9.967	418595.342	4589104.55	PA4'
PA4-PA5	128.1373	299.6767	203.8383	172.3402	12.371	5.208	-11.222	418600.549	4589093.32	PA5'
PA5-PA1	199.2189	-	303.3805	271.8823	25.142	-22.729	-10.747	418600.527	4589093.313	PA5'

Tabla 4. Cálculo coordenadas aproximadas



$$X_B = X_A + \Delta X_A^B = X_A + D_A^B \cos \theta_A^B$$

$$Y_B = Y_A + \Delta Y_A^B = Y_A + D_A^B \sin \theta_A^B$$

Por último, se comprueba si los errores de cierre son tolerables tanto en el error de cierre angular como el error en coordenadas. En caso afirmativo se procede a la compensación, y en caso negativo se deben repetir las observaciones. En este caso, ambos están dentro de las tolerancias permitidas. Por lo tanto, se procede a la compensación de dichas coordenadas UTM.

Acimut PA5-PA1 conocido = 271.8851	[gon]	$E_x = 0.022$	[m]
<b>Error de cierre angular = 0.0027</b>	[gon]	$E_y = 0.011$	[m]
<b>T(a) = 0.0385</b>	[gon]	<b>Error de cierre en coord = 0.025</b>	[m]
		<b>T(x,y) = 0.032</b>	[m]

Tabla 5. Errores de cierre y tolerancias

#### 4.2.4 Compensación rigurosa

Una vez comprobado que los errores cometidos entran dentro de las tolerancias procedemos a la compensación. Existen varios métodos para compensar dichas coordenadas. Se realiza un ajuste mediante mínimos cuadrados utilizando la compensación por observaciones indirectas, resolviendo el sistema aplicando mediante la búsqueda de un valor mínimo para la suma de los cuadrados de los valores residuos de la medición. Un valor residuo de medición es la cantidad necesaria para corregir una medición, para que así pueda tener cabida en la solución ideal hallada por el ajuste por mínimos cuadrados.

La ecuación general de la forma lineal de las observaciones angulares es:

$$\begin{aligned} a_{i-1}dx_i + a_idx_i + a_{i+1}dx_{i+1} + b_{i-1}dy_{i-1} + b_idy_i + b_{i+1}dy_{i+1} = \\ = \alpha_0 - \alpha_c + R_\alpha = U + R_\alpha \end{aligned}$$

Siendo:

$$\begin{aligned} a_{i-1} &= \frac{y_i - y_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2} & b_{i-1} &= -\frac{x_i - x_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2} \\ a_i &= -\left[\frac{y_{i+1} - y_i}{l_{i(i+1)}^2} + \frac{y_i - y_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2}\right] & b_i &= \frac{x_{i+1} - x_i}{l_{i(i+1)}^2} + \frac{x_i - x_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2} \\ a_{i+1} &= \frac{y_{i+1} - y_i}{l_{i(i+1)}^2} & b_{i+1} &= \frac{x_{i+1} - x_i}{l_{i(i+1)}^2} \end{aligned}$$

Y de las observaciones distanciométricas:

$$d_c = dl_{ii} = dy_i \cos \theta_{ic}^j - dy_i \cos \theta_{ic}^j + dx_j \sin \theta_{ic}^j - dx_i \sin \theta_{ic}^j$$

Los componentes del sistema matricial y el cálculo realizado mediante el ajuste mínimo cuadrático del sistema normal son:

$$Ax = t$$

$$A^T P A x = A^T P t$$

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P t$$

Y resolviendo obtenemos las correcciones que tenemos que aplicar a las coordenadas aproximadas para compensarlas:

$$X = \begin{pmatrix} 0,006 \\ 0,000 \\ 0,009 \\ 0,004 \\ 0,016 \\ 0,008 \end{pmatrix}_m$$

Debido a la redundancia de observaciones se trata de un sistema lineal sobredimensionado, con 8 ecuaciones y 6 incógnitas, siendo la varianza de referencia a posteriori:

$$\sigma_0^2 = \frac{v^T P v}{n - h} = 8.55$$

Donde  $v$  es el vector residuos,  $P$  la matriz de pesos,  $n$  el número de ecuaciones y  $h$  el número de incógnitas.

Mientras que la desviación estándar es:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_0^2} = 2.92$$

La desviación estándar es una medida del grado de dispersión. El valor de la desviación debería de ser próximo a 1 para garantizar un buen resultado. En este caso ha sido superior porque tres visuales de la poligonal son demasiado cortas, y al realizar las observaciones el error es mayor.

#### 4.2.5 Elipses de error

Finalmente obtenemos las coordenadas compensadas junto con el error asociado a ellas, o mediante una representación gráfica, formando las elipses de error, que definen la zona de incertidumbre en el que se encuentra la solución de las coordenadas a partir de los errores asociados calculados con anterioridad. También obtenemos el ángulo de orientación de la elipse.

Estos parámetros son expresados en función de probabilidad, expresados en este caso con el 68% y el 95% de fiabilidad (según *t-student*).

ID Punto	68%		95%		w [gon]
	a [m]	b [m]	a [m]	b [m]	
PA-2	0.009	0.006	0.016	0.011	-10.3589
PA-3	0.011	0.008	0.020	0.013	10.1711
PA-4	0.011	0.008	0.019	0.013	-7.4998

Tabla 6. Elipses de error



### 4.3 NIVELACIÓN GEOMÉTRICA

Para obtener la mayor precisión en lo que respecta a la altimetría es necesario emplear la nivelación geométrica. El instrumento utilizado para llevar a cabo este tipo de nivelación ha sido un nivel óptico de burbuja partida (Figura 10), el cual hay que nivelar hasta conseguir emparejar las dos mitades de la burbuja y así obtener el desnivel entre dos puntos, mediante la medición de la distancia en vertical de cada uno de ellos a un plano horizontal de comparación. Siendo este plano el definido por el eje óptico del nivel al girar sobre su eje vertical. Por otro lado, se trata de una nivelación simple, ya que con un solo estacionamiento somos capaces de obtener el desnivel entre dos puntos.



Figura 10. Nivel de burbuja partida

A su vez, se pueden emplear diferentes métodos. Por ejemplo, el método de las estaciones equidistantes. Se estaciona en un punto E cualquiera situado entre los puntos A y B que delimitan el tramo a nivelar, realizando las lecturas correspondientes a los mismos. Posteriormente se estaciona en un segundo punto E' debiendo cumplir la condición de que  $E'B = EA$  realizándose de nuevo la lectura a ambas miras. Si el aparato tuviera un error residual sería:

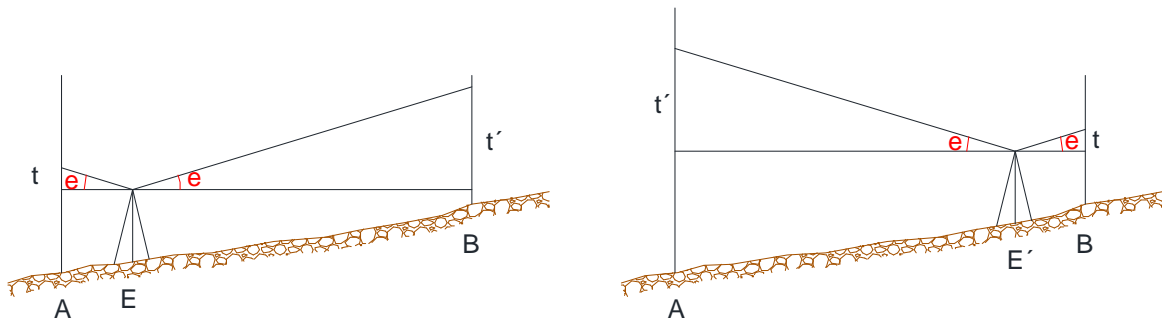


Figura 11. Método de las estaciones equidistantes 1

$$\text{Estación E: } Z_A^B = (m_A - t) - (m_B - t')$$

$$\text{Estación E': } Z_A^B = (m'_A - t') - (m'_B - t)$$

Promediando ambos desniveles obtenemos el desnivel definido entre A y B. Siendo  $m_A$ ,  $m'_A$ ,  $m_B$ ,  $m'_B$ , las lecturas realizadas en la mira.

$$Z_A^B = \frac{m_A - m_B}{2} + \frac{m'_A - m'_B}{2}$$

Para comprobar que el nivel está corregido y verificar la calidad del mismo, los dos siguientes sumandos deberían ser iguales.

$$Z_A^B = m_A - m_B - t + t'$$

$$Z_A^B = m'_A - m'_B + t - t'$$

Restando ambas expresiones podemos conocer el error residual:

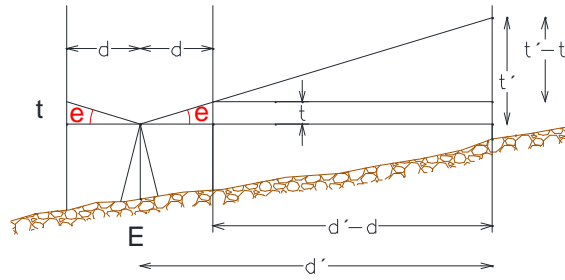


Figura 12. Método de las estaciones equidistantes 2

$$0 = (m_A - m_B) - (m'_A - m'_B) - 2t + 2t'$$

$$t' - t = \frac{(m'_A - m'_B)}{2} - \frac{(m_A - m_B)}{2}$$

$$e = a \quad t: \frac{t' - t}{d' - d}$$

#### 4.4 RADIACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO Y CONTROL

Una vez obtenidas las coordenadas que conforman la red de control topográfico en un sistema de referencia absoluto se procede a radiar los puntos de apoyo y control topográfico y fotogramétrico. Primeramente, en campo, se colima sobre uno de los puntos de la red, para calcular así la desorientación en gabinete. Los puntos radiados se obtienen a partir de datos polares (ángulos y distancias), apuntando con el distanciómetro láser, incorporado en la estación total, sobre puntos fácilmente identificativos, como por ejemplo las esquinas de las piedras de los muros, las cuales tienen diferentes tonalidades.



Figura 13. Radiación punto de control

En resumen, siempre operamos de la misma forma, utilizando como punto base el de coordenadas de la estación y orientación conocida para obtener los puntos de apoyo y control. Los cálculos para obtener dichas coordenadas se encuentran adjuntos en el CD-ROM, en la hoja de cálculo Excel "MMCC", en la pestaña "Puntos de control".

## 5. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

### 5.1 INSTRUMENTACIÓN

#### 5.1.1 Cuadricóptero

El modelo de cuadricóptero utilizado es el Phantom 2 de la empresa DJI (Figura 14). Se trata de una aeronave ligera, de 1kg con la batería incorporada, que le permite 20 minutos de vuelo aproximadamente. La frecuencia de operación del control remoto es de 2.4 GHz, capaz de mantener una comunicación con la aeronave a 1 km, controlada en todo momento manualmente, desde el punto de vista del navegante. Se empleó un control directo, aunque también es posible el control remoto del vehículo mediante un pequeño transmisor de cámara y video. A este modo de vuelo se le denomina FPV (Flight Point View), pero requiere de un mayor gasto económico en el equipo. Por otro lado, lleva incorporado un sistema cardan H3-3D, capaz de ofrecer una excelente estabilización al sistema fotográfico, absorbiendo las vibraciones del dron y así poder hacer una toma fotográfica con menor ruido.



Figura 14. Cuadricóptero Phantom 2



### 5.1.2 Cámara fotográfica

La cámara fotográfica es de tipo estándar y su principal característica es el campo de visión ancho. Esta cámara, mundialmente conocida como GoPro (Figura 15), es muy utilizada en deportes extremos por su pequeño tamaño, muy útil para poderla llevar en cualquier sitio.

En este caso nos es útil por su reducido peso, ya que así el dron puede levantarla sin mucho esfuerzo y tener mayor autonomía. Además el dron, solamente está preparado para llevar cámaras de pequeño tamaño y peso.

Hay que tener en cuenta que la velocidad de obturación, abertura y sensibilidad ISO son automáticos en esta cámara.



Figura 15. Go Pro Hero 3 Silver Edition

### 5.1.3 Software

Uno de los programas utilizados para la reconstrucción del modelo ha sido Pix4D. Este tipo de programas se basan en la búsqueda de forma automática de miles de puntos comunes entre las imágenes. Estos puntos se denominan puntos de enlace y cuando son detectados en dos o más imágenes generan un punto en el espacio. Cuanto más solapamiento haya entre las imágenes, más puntos homólogos habrá y con más seguridad se podrán calcular los puntos proyectados.

#### **5.1.4 Hardware**

Han sido varios los ordenadores utilizados para procesar las imágenes en el sistema fotogramétrico digital (Pix4D mapper). Principalmente donde se han empleado más horas ha sido en el ordenador portátil personal (Lenovo Thinkpad) y también en el laboratorio de fotogrametría. De cualquier modo, el sistema requiere de unos requisitos mínimos para que el tiempo de procesado sea menor. La siguiente descripción muestra los requisitos de hardware recomendados:

- Windows 7, 8 64 bits.
- CPU de cuatro núcleos o hexa-core Intel Core i7 / Xeon.
- GeForce GPU compatible con OpenGL 3.2 y 2 GB de RAM.
- Disco duro: SSD.
- Los proyectos pequeños (menos de 100 imágenes de 14 MP): 8 GB de RAM, 15 GB SSD espacio libre.
- Proyectos medianos (entre 100 y 500 imágenes en 14 MP): 16 GB de RAM, 30 GB SSD de espacio libre.
- Los grandes proyectos (más de 500 imágenes de 14 MP): 32 GB de RAM, 60 GB SSD de espacio libre.
- Proyectos muy grandes (más de 2000 imágenes en 14 MP): 32 GB de RAM, 120 GB SSD de espacio libre.

## **5.2 TOMA FOTOGRÁFICA AÉREA**

La toma de fotografías desde un UAV de radiocontrol, nos ofrece mayores posibilidades en la toma de datos. Mediante un vehículo aéreo no tripulado podemos realizar fotografías cercanas a los monumentos y como resultado obtendremos modelos tridimensionales completos y a color del edificio objeto del levantamiento.

Se debe tomar en consideración una serie de factores a la hora de capturar las imágenes. Estos factores a tener en cuenta son el plan de adquisición de las imágenes, la altura de vuelo y el recubrimiento.

### 5.2.1 Plan de vuelo

El plan ideal de adquisición de las imágenes depende del tipo de terreno o, en este caso, del elemento patrimonial a levantar. La reconstrucción de edificios requiere del plan mostrado en la (Figura 16). En este plan hay que sobrevolar alrededor de la ermita una primera pasada con un ángulo de 45 grados respecto al suelo, en la segunda pasada, a mayor altura, hay que disminuir dicho ángulo. La segunda pasada ha sido suficiente para fotografiar la cubierta de la ermita. Si la iglesia hubiera sido más alta, podríamos haber realizado más pasadas en niveles superiores, reduciendo el ángulo en la toma fotográfica.

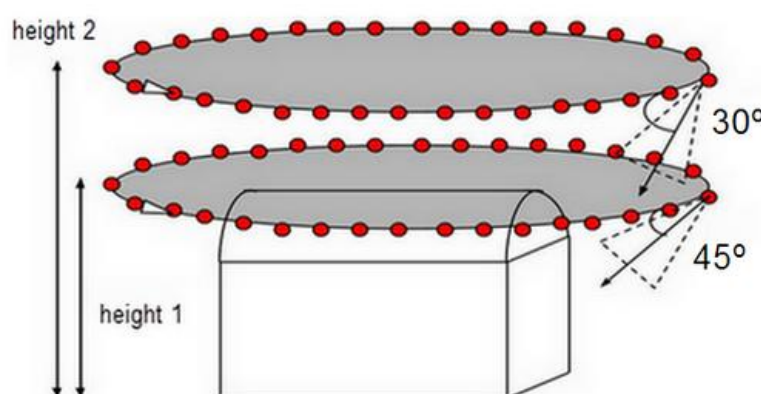


Figura 16. Plan de adquisición de las imágenes

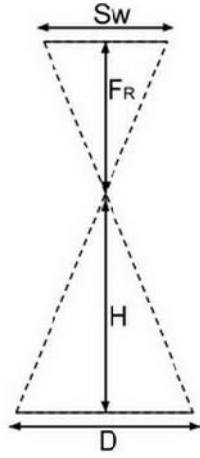
### 5.2.2 Altura de vuelo

La altura de vuelo dependerá de la escala del levantamiento, de la focal de la cámara y del detalle necesario a capturar. El detalle mínimo depende del tamaño del píxel a escala fotográfica, o dicho de otro modo, de la huella del píxel sobre el terreno (GSD). El GSD (Ground Sampling Distance) es la distancia entre el centro de dos píxeles consecutivos medidos en la superficie. Cuanto mayor sea dicho valor, menor será la resolución espacial de la imagen y los detalles serán menos visibles.

Partiendo de los resultados finales a obtener, definiremos la altura de vuelo para la toma fotográfica. En este caso queremos obtener unos alzados ortofotográficos a escala 1/50, sabiendo que le corresponde una tolerancia de 1 cm, la resolución elegida será de un cuarto de la tolerancia, es decir, 0.25 cm. Dicha resolución define dicha distancia a la que deben ser tomadas las imágenes, así como la calidad de las imágenes resultantes.



La altura de vuelo  $H$  depende de la focal de la cámara, la altura del sensor y de la altura de la imagen.



$S_w$  = ancho sensor real [mm]

$F_R$  = distancia focal real [mm]

$H$  = altura de vuelo [m]

$D$  = distancia recorrida sobre el suelo por una imagen [m]

Figura 17. Altura de vuelo

La distancia de vuelo  $H$  viene dada por:

$$\frac{H}{F_R} = \frac{D}{S_w}$$

$$H = \frac{(D \cdot F_R)}{S_w} \quad (1)$$

La distancia recorrida sobre el suelo por una imagen viene dada por la DM deseada y el alto de la imagen en píxeles:

$$D = \frac{\text{alt DM}}{100} \quad (2)$$

Dónde:

$D$  = distancia recorrida sobre el suelo o superficie por una imagen [m]

altI = alto del sensor/imagen[filas/píxeles]

$DM = DM \text{ deseada} \left[ \frac{\text{cm}}{\text{pixel}} \right]$

Combinando las ecuaciones (1) y (2):

$$H [m] = \frac{(a \cdot D \cdot F_R)}{(S_w \cdot 1)} \quad (3)$$

Por consiguiente, con una cámara –GoPro Silver Edition- de longitud focal 2.8 mm, con alto del sensor de 3.864 mm, y alto de la imagen de 2760 píxeles. Utilizando la ecuación (3) la distancia ideal al elemento debe ser 5 m.

### 5.2.3 Recubrimiento

Depende de la velocidad a la que vaya el dron, el tiempo transcurrido entre dos imágenes, del valor GSD y de la cámara utilizada (píxeles de resolución).

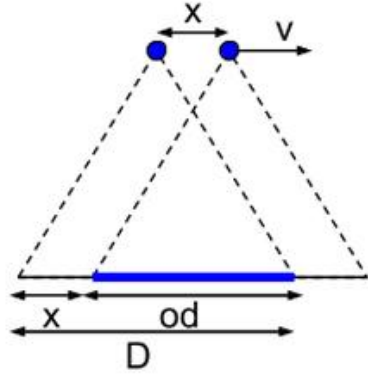


Figura 18. Recubrimiento

$D$  = Distancia recorrida [m]

$od$  = recubrimiento entre dos imágenes [m]

$x$  = distancia entre dos posiciones de cámara [m]

$v$  = velocidad de vuelo [m/s]

$t$  = tiempo transcurrido entre dos imágenes [m/s]

Solape = porcentaje deseado

Ecuaciones:

$$od = \text{recubrimiento } D \quad (4)$$

$$x = D - od \quad (5)$$

$$t = x/v \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que la anchura del sensor está posicionado paralelo a la dirección de vuelo.

$$D = D_w = (IMW \cdot GSD)/100 \quad (7)$$

Dónde:

$D_w$  = distancia recorrida en la dirección del ancho de la imagen [m]

$IMW$  = ancho de la imagen [píxeles]

$GSD$  = GSD deseada

Resolvemos:

$$x = D_w = \text{solapamiento } D_w$$

$$x = D_w (1 - \text{solapamiento})$$

$$x = \left( \frac{(IMW \cdot GSD)}{1} \right) \frac{(1 - \text{solapamiento})}{v}$$

### 5.3 MODELADO TRIDIMENSIONAL

El resultado final de un proceso fotogramétrico es un modelo 3D. Para ello se ha empleado el algoritmo SfM (*structure from motion*), permitiendo en primera instancia una nube de puntos discreta, la cual puede variar en densidad en función de las correspondencias detectadas entre imágenes (Pereira Uzal, 2013).

El paso inicial como resultado de la nube de puntos discreta corresponde al ajuste aerofotogramétrico en bloque (*Bundler*). Este ajuste permite identificar una serie de píxeles coincidentes en el solape de las distintas imágenes y posicionar las cámaras en el espacio. La detección de estos píxeles coincidentes en dos o más imágenes se lleva a cabo en el proceso automático llamado SIFT (*scale-invariant feature transform*).

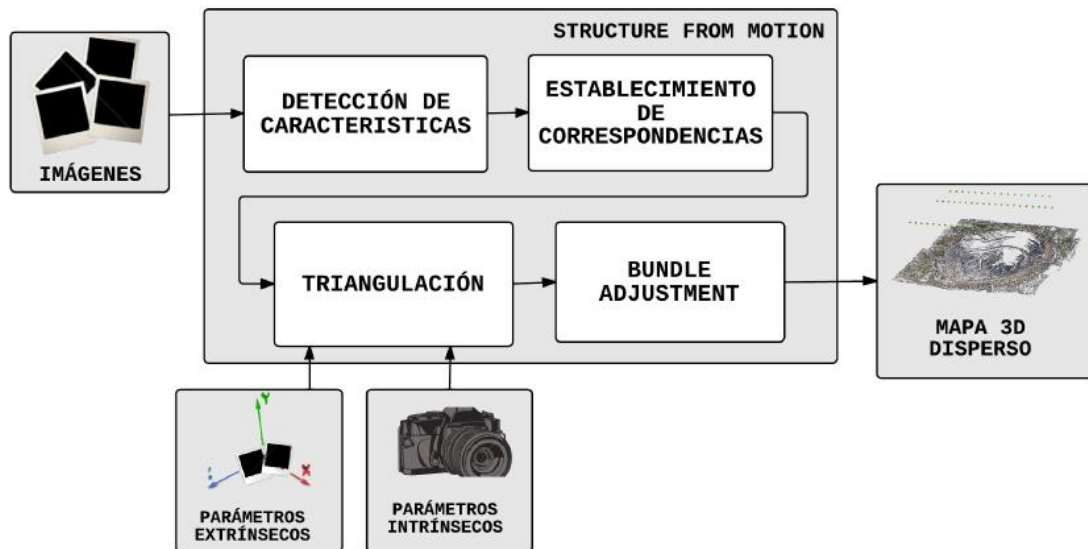


Figura 19. Algoritmo SfM (Structure from motion)

Después de obtener la nube de puntos discreta se procede a determinar la nube de puntos densa, que reflejará la geometría del elemento con mejor detalle. La información de dichos puntos se compone por unas coordenadas XYZ en un sistema cartográfico además del color almacenada como valores RGB. Es conveniente saber la posibilidad de almacenamiento de otro tipo de datos no tan convencionales, como la radiación, gracias a las cámaras multiespectrales.

### 5.3.1 Imágenes

Las imágenes han sido tomadas con la más alta resolución que soporta la cámara, 10 megapíxeles. De esta manera tendremos más píxeles y por consiguiente más puntos para la reconstrucción del modelo. Las medidas de las imágenes son: 3680 píxeles a lo ancho y 2760 píxeles a lo alto. Nos hemos excedido en el recubrimiento pero no hay ningún problema, ya que podemos seleccionar las imágenes que mejor nos convenga, esto ha sido debido a que la velocidad de disparo entre cada fotografía ha sido de 1 segundo, obteniendo así 302 imágenes. Después del depurado nos hemos quedado con 126 imágenes en total.



Figura 20. Imagen "G0013446" con distorsión

Estas imágenes tienen que ser corregidas para eliminar la distorsión producida por la lente, mediante un polinomio radial efectuado en el proceso de calibración que explicaremos más adelante.



Figura 21. Imagen "G0013446" sin distorsión

### 5.3.2 Detección de características

Para la extracción de píxeles relevantes en las imágenes existen diversos algoritmos, uno de los más conocidos es el SIFT (Scale-invariant feature transform), publicado por David Lowe en 1999. Normalmente esta extracción se lleva a cabo gracias al análisis de los píxeles vecinos, por lo que se detectarán con mayor facilidad en esquinas o texturas con diferente contraste. La particularidad de este algoritmo es que extrae características de la imagen que son invariantes a escala de imagen y rotación y parcialmente invariantes a cambios en la iluminación y el punto de vista de la cámara 3D (transformación afín).

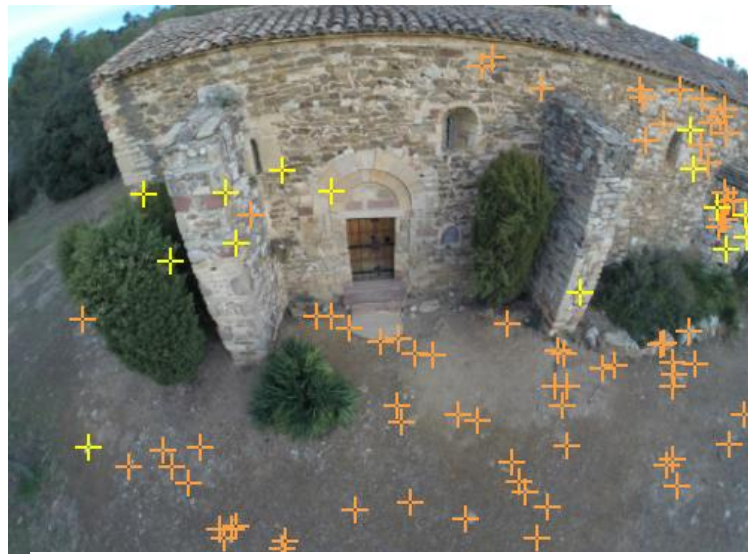


Figura 22. Puntos de interés

### 5.3.3 Establecimiento de correspondencias

La correspondencia entre los puntos de interés de dos imágenes se obtiene a través de una búsqueda del punto más próximo en el espacio de los descriptores de puntos de interés (Figura 22). Es decir, para emparejar puntos de interés, necesitamos de un vector formado a partir de los histogramas definidos a partir de los valores de magnitud y orientación.

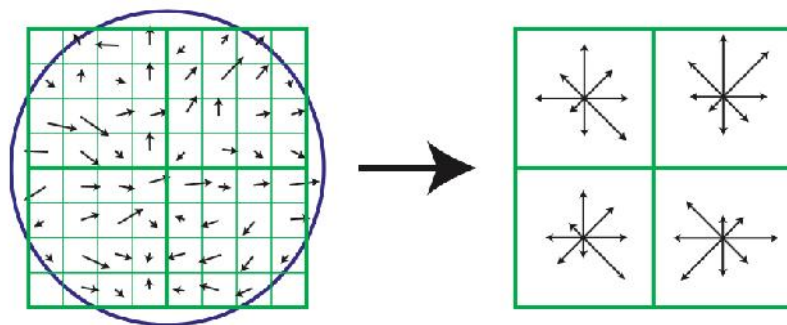


Figura 23. Descriptores de puntos

### 5.3.4 Aéerotriangulación

Para poder aéerotriangular y obtener así la posición tridimensional de cada uno de los puntos que componen el modelo 3D es necesario conocer una serie de parámetros. Estos son los parámetros intrínsecos (internos) y extrínsecos (externos).

Hoy en día se encuentra en el mercado gran variedad de cámaras digitales no-métricas, tanto para el uso fotográfico profesional, como para uso familiar (amateur). Estas cámaras poseen buena calidad radiométrica, pero mala calidad geométrica, provocada por la distorsión del objetivo. Por ello, antes de utilizar estas cámaras en tareas fotogramétricas es necesario realizar la calibración de las mismas, y así reconstruir el haz proyectivo. Este proceso de reconstrucción del haz se denomina orientación interna.

La mayoría de los procesos de calibración se realizan en laboratorios, aunque también existen metodologías para la obtención de los elementos mediante observaciones de campo. El proceso normal consiste en fotografiar una placa reticulada de gran estabilidad dimensional (damero) cuyos puntos de la retícula tienen coordenadas perfectamente definidas. La comparación entre estas coordenadas y los resultantes de medir su imagen en la fotografía, establece los parámetros de calibración interna de la cámara.

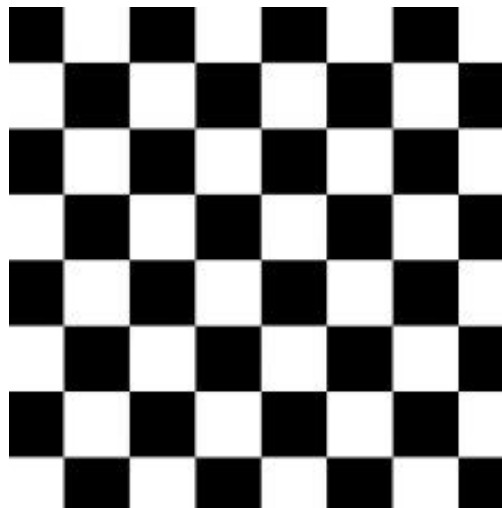


Figura 24. Damero

#### 5.3.4.1 Parámetros intrínsecos

Los parámetros intrínsecos son aquellos que definen la geometría interna y la óptica de la cámara. Éstos determinan cómo proyecta los puntos del mundo 3D al plano de la imagen en 2D, siendo constantes en tanto no varíen las características y posiciones relativas entre la óptica y el sensor. Los parámetros intrínsecos se establecen en el proceso de calibración y se detallan a continuación.

- El **punto principal**: es el punto intersección entre el plano de la imagen y el eje. Las coordenadas de este punto vienen dadas en píxeles, y son expresadas respecto al sistema solidario al plano de la imagen.
- La **distancia focal**: es la distancia existente entre el punto de vista (centro óptico) y el punto principal. Las coordenadas de este punto vienen dadas en píxeles o en milímetros.
- **Distorsión**: Establecida como una función polinómica que permite determinar la separación entre el punto real y su posición teórica.

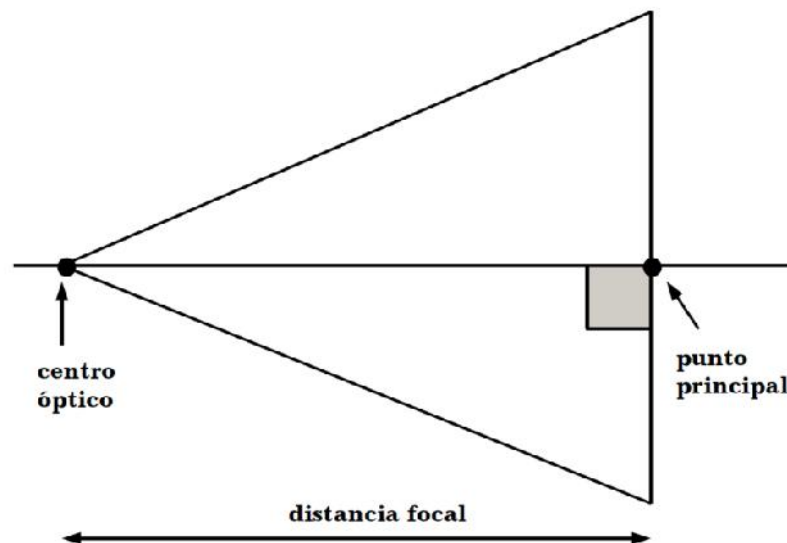


Figura 25. Parámetros intrínsecos de una cámara

### 5.3.4.2 Parámetros extrínsecos

Los parámetros extrínsecos definen la posición de la cámara en el momento de la toma en cada una de las imágenes. Esta información se puede obtener de diferentes modos.

El primero, con un GPS y un sistema IMU (unidad de medición inercial) instalado en el dron, podemos saber la posición exacta de la captura de las imágenes y cada una de las orientaciones de las mismas.

El segundo, el que nosotros hemos empleado, prescindiendo de los sistemas anteriormente mencionados, mediante el establecimiento de puntos en común entre cada una de las imágenes y puntos de control terrestre. Utilizando esta metodología será necesario establecer los puntos de apoyo obtenidos mediante observaciones GNSS para así, georreferenciar el modelo para que los resultados finales tengan orientación y escala.

De cualquier modo, los parámetros a obtener son los ángulos de rotación para la transformación del sistema de referencia global al sistema de la cámara y los componentes de traslación para la transformación del sistema de referencia global de cada imagen.

Los tres ángulos de giro son conocidos como los ángulos de Euler o del sólido rígido, y corresponden con el *roll*, *pitch* y *yaw* utilizados en navegación para describir la orientación de un objeto en tres dimensiones.

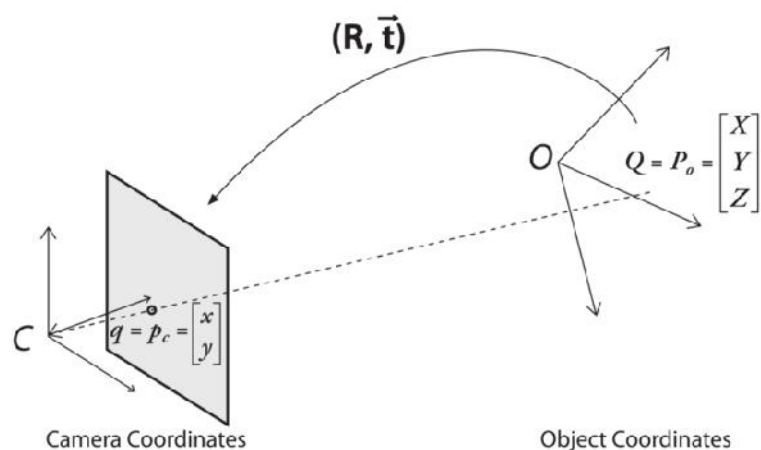


Figura 26. Parámetros extrínsecos



### 5.3.5 Ajuste en bloque (Bundle adjustment)

El procedimiento para el ajuste en bloque es a través del uso de los haces de rayos producidos por los fotogramas individuales, donde son posibles las configuraciones convergentes producidos por una posición múltiple de la cámara. Éste método genera multitud de ecuaciones, por este motivo requiere potencia de cálculo por parte del hardware utilizado.

La Figura 27 muestra el principio. Las coordenadas imagen y el centro de proyección asociado de una fotografía definen un haz espacial de rayos. Los elementos de la orientación externa de todos los haces de un bloque se calculan simultáneamente para todas las fotografías.

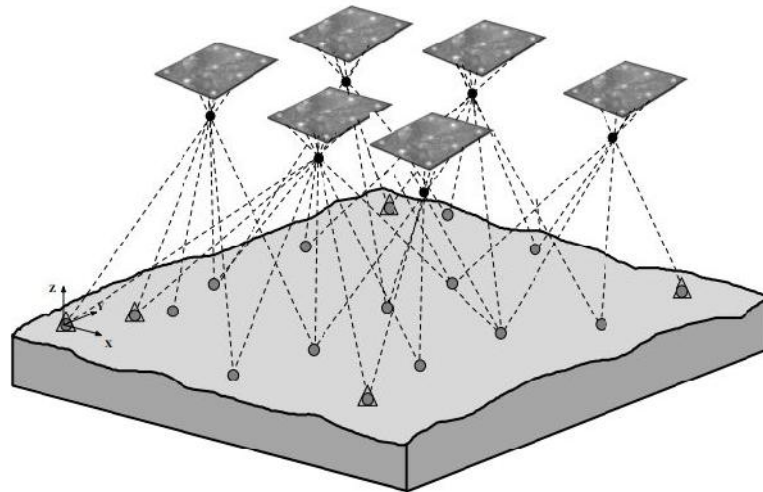


Figura 27. Ajuste en bloque

El principio de este ajuste se basa en que los haces de rayos se desplazan tres translaciones y giran tres, intersectando entre sí en los puntos de control menores y mayores.

Los datos iniciales necesarios para realizar el ajuste son:

- Los parámetros de orientación interna del fotograma ( $c, x_o, y_o, x_F, y_F$ )
- Los parámetros de orientación externa del fotograma ( $X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \beta, \gamma$ ).
- Las coordenadas imagen de los puntos de control mayores y menores ( $x', y'$ )
- Las coordenadas terreno de los puntos de apoyo ( $X, Y, Z$ ).

### 5.3.6 Densificación de la nube de puntos

Una vez realizado el modelo de puntos disperso después de haber ajustado el bloque es posible densificar la nube de puntos (Figura 28). Para densificar la nube es necesario hacer uso de técnicas de correlación que permitan la resolución espacial del modelo final. Inicialmente, habiendo ajustado el bloque teníamos un total de 600000 puntos, después de densificar se han conseguido más de 9 millones de puntos.



Figura 28. Nube de puntos densificada (9030981 puntos)

### 5.3.7 Eliminación de puntos erróneos

Una vez generada la nube de puntos densificada, el propio programa tiene un editor de puntos para poder clasificarlos manualmente, en este caso seleccionaremos los puntos que por error no coinciden con la realidad y los eliminaremos (Figura 29).

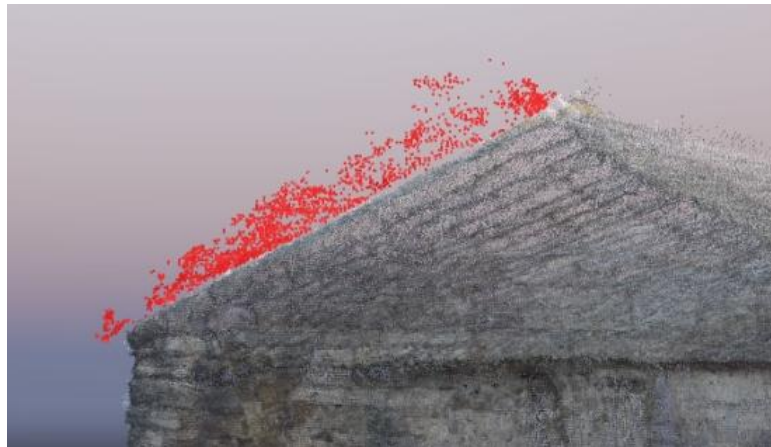


Figura 29. Eliminación de puntos erróneos

### 5.3.8 Creación de la malla

Una vez tenemos la nube de puntos depurada procedemos a generar la malla de triángulos (Figura 30) que forman el modelo tridimensional mediante el proceso conocido como TIN (Triangular Irregular Network). Para ello hay que configurar correctamente las opciones más acordes al tipo de superficie. Estas configuraciones se explican con más detalle en el Anexo 2: Análisis del Informe de Calidad.



Figura 30. Malla de triángulos monocolor

### 5.3.9 Texturizado

Finalmente, los puntos 3D son reproyectados en las imágenes originales para obtener así el color correspondiente haciendo un promedio entre los diferentes valores RGB de dichos puntos en las distintas imágenes en las que aparecen. Estos píxeles con información colorimétrica generan una imagen (JPG) como se muestra a continuación.



Figura 31. Textura

Por último, el modelo tridimensional texturizado (Figura 32) es generado, pudiéndolo exportar en distintos formatos (PLY, XYZ, PNT) para poder trabajar con él en otros programas.



Figura 32. Modelo 3D texturizado

## 6. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto es la obtención de un modelo 3D utilizando una cámara ultra gran angular. Pues bien, no solamente se ha obtenido dicho modelo, sino que las discrepancias entre las coordenadas de los puntos de control obtenidos a partir de técnicas topográficas y fotogramétricas han cumplido nuestras expectativas. El error medio ha sido de 1 centímetro.

Por lo tanto, aunque el empleo de la cámara estándar con óptica ultra-gran-angular en fotogrametría no es recomendable, podemos concluir que los resultados son satisfactorios gracias a que los sistemas fotogramétricos son capaces de corregir las distorsiones de las imágenes gracias a los procesos de auto-calibración integrados en el software.

También se esperaba explotar dicho modelo 3D para obtener las ortofotografías a escala 1:50, tanto de las fachadas como de la planta. Hay que decir que la escala de impresión de dichas ortofotografías se ha modificado a 1:100 para que se puedan visualizar en un papel tamaño A4. Además se han generado cuatro isometrías a escala 1:300 (escala de impresión).

La principal ventaja del uso del quadricóptero ha sido poder levantar la totalidad del elemento patrimonial. Para el uso del mismo, hay que poseer cierta habilidad en el manejo con el radiocontrol, aparte de poseer la licencia de piloto de dron. También tener en cuenta la ley que regula el uso de drones, que es muy estricta.

Por otro lado, el software utilizado (Pix4D mapper) requiere de licencia de pago. Esto no hace que los resultados sean mejores ni peores, se ha comprobado con otro software libre (PhotoScan de Agisoft). Hay que tener en cuenta qué plan de adquisición de imágenes requiere cada programa. Como punto favorable, los software de pago tienen buena asistencia técnica, así como continuas actualizaciones.

Respecto a los sistemas fotogramétricos (software), las interfaces gráficas hacen muy intuitivos los programas, estando al alcance de cualquier usuario. Esto no quiere decir que cualquiera pueda ofrecer un buen producto.

El método utilizado es el que más se adapta para este tipo de levantamiento. En la actualidad, las técnicas fotogramétricas están en continuo desarrollo, permitiendo procesados más rápidos y obteniendo mejores resultados. No hay que olvidar que la topografía clásica es imprescindible como apoyo al trabajo fotogramétrico.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

### Libros

Manuel Chueca Pazos. *Métodos topográficos: topografía y fotogrametría*. S. A. Ediciones Paraninfo, 1996. ISBN: 9788428323093.

José Luis Ojeda Ruiz. *Métodos topográficos y oficina técnica*. 2ª edición. Autor-Editor. ISBN: 9788439809180.

José Luis Lerma García. *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. 2ª edición. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2002. ISBN 84-9705-210-2.

Toni Schenk. *Fotogrametría digital*. Traducido por el instituto Cartográfico de Catalunya. 1ª edición. Marcombo, 2002. ISBN-10 842671331, ISBN-13: 978-8426713315.

CARABASSA, Lluïsa. Santa Eulàlia de Madrona (la Salut del Papiol), vol. XIX de Guies Catalunya Romànica. Barcelona, 2002. Ed. Enciclopèdia Catalana.

### Sitios web

Parròquia de Santa Eulàlia del Papiol. [Última consulta: Noviembre 2015]. Disponible en:

<<https://sites.google.com/site/santaeulalia565/ermita-de-la-salut>>

Pix 4D mapper. [Última consulta: Noviembre 2015]. Disponible en:

<<https://www.pix4d.com/support/>>

J. Pereira. [Última consulta: Agosto 2015]. Disponible en:

<<http://www.jpereira.net/software-revisiones-y-consejos/bundler-sfm-fotogrametria-open-source>>

### Artículos

Dr. A.P. Mihaylov, Dr. A.G. Chibunichev, Dr.V. M. Kurkov. "*Utilización de las cámaras digitales no-métricas y los barredores láser para resolver problemas en fotogrametría*".

Disponible en:

<[http://www.racurs.ru/www\\_download/articles/Camaras\\_digitales.pdf](http://www.racurs.ru/www_download/articles/Camaras_digitales.pdf)>

Andrea Lingua, Davide Marenchino and Francesco Nex. "*Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications*".

Disponible en:

<<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3297131/#b35-sensors-09-03745>>





## **8. AGRADECIMIENTOS**

Viniendo del mundo laboral, concretamente de la ingeniería civil, para adquirir este título tan importante para mí, me complace expresar en este capítulo mi inmensa gratitud, no solamente por la obtención de esta etiqueta de ingeniero, sino también, de todo el conocimiento adquirido durante mi estancia en la Escuela, gracias a todo el profesorado que imparte clases en el Grado en Geomática y Topografía.

Hago especial hincapié en expresar mi agradecimiento al director del proyecto Felipe Buill, por su apoyo y dedicación, quien ha estado en todo momento para resolver cualquier duda o sugerencia.

Asimismo, agradezco a todos los compañeros de grado, todos los buenos momentos compartidos durante todo este periodo. Siempre recordaré las clases sin ánimo de lucro de Jordi Casals, o el buen humor y constancia de Eduardo Toledo, quienes han dejado su granito de arena en este proyecto, ayudándome en la obtención de datos.

No podría faltar mi agradecimiento a mi familia, a mis padres y a mi hermano, que sin su ayuda no podría haber hecho realidad este sueño.

Por último y no menos importante, quiero dejar constancia de mi infinita gratitud a mi compañera Anna Ortega, que durante estos cuatro años ha compartido conmigo su tiempo tan preciado, ofreciéndome su cariño y apoyo, entre otras muchas cosas. Gracias.



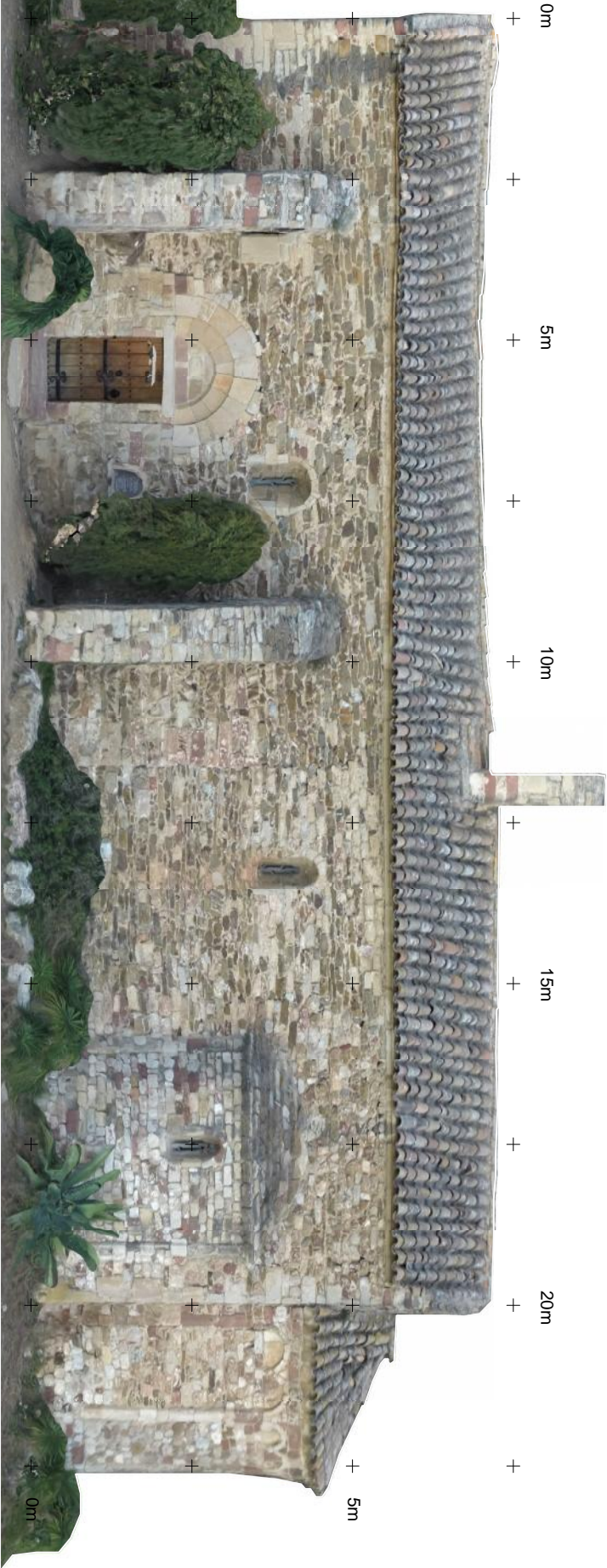
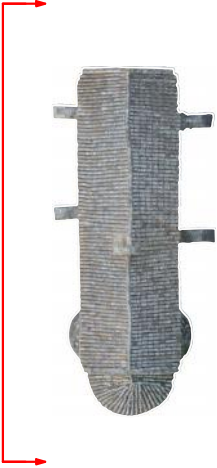
## **9. CONTENIDO DEL CD-ROM**

- Memoria.
- Anexos.
- Proyecto. Observaciones GNSS (Leica GeoOffice).
- Cálculos de la red topográfica (Excel).
- Imágenes.
- Proyecto. Sistema Fotogramétrico (Pix4D mapper).
- Modelo 3D en formato PDF (Pix4D).
- Informe de calidad generado por el SF (Pix4D mapper).
- Planos (AutoCAD).
- Vídeo del recorrido por el modelo (Render).



## **10. PLANOS**



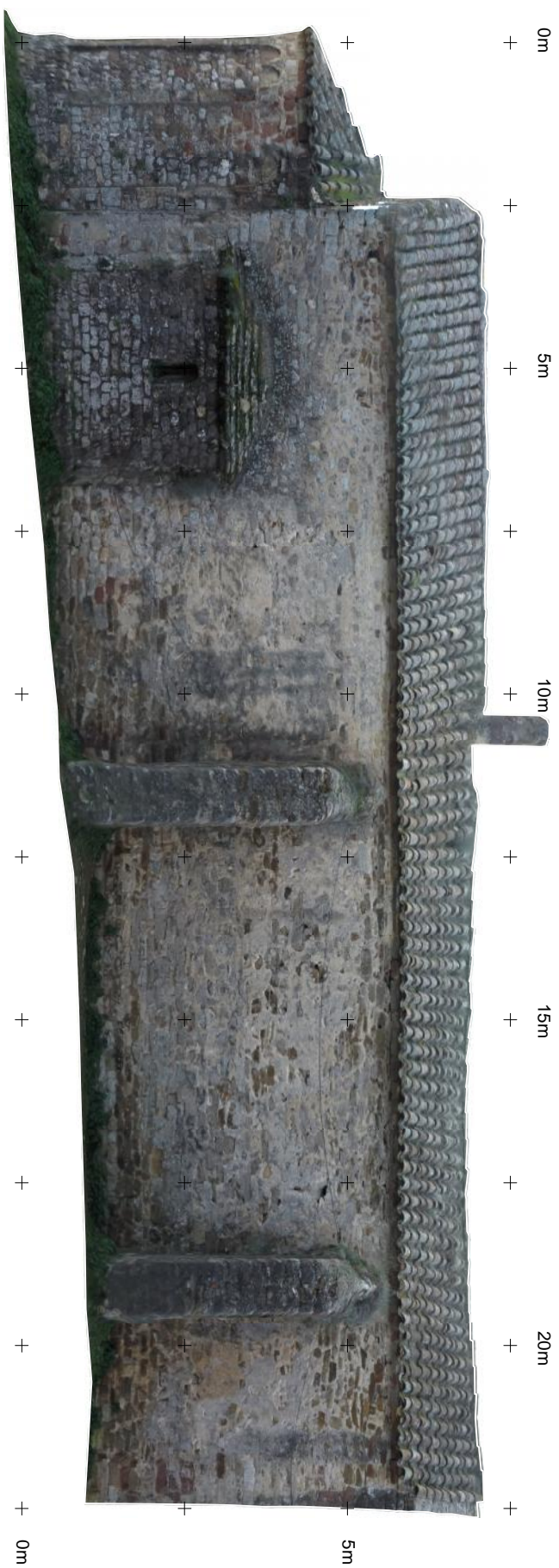


<div><div><div><div>EPSEB</div><div>Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona</div></div></div><div><div></div><div>Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía</div></div></div>				Título del proyecto:		Proyectista: Javier Muniente Castro		Título del plano:		Nº de plano: 1 de 6	
Modelado tridimensional de la ermita de la Salut en el municipio de el Papiol				Director: Felipe Bull Pozuelo		ORTOFOTOGRAFÍA FACHADA SUR		Escala real: 1:50		Escala impresión: 1:100	



<div><div></div><div></div><div>EPSEB</div><div>Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona</div></div>			Título del proyecto:		Proyectista: Javier Muniente Castro		Título del plano:		Nº de plano: 2 de 6	
Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía			Modelado tridimensional de la ermita de la Salut en el municipio de el Papiol		Director: Felipe Bull Pozuelo		ORTOFOTOGRAFÍA FACHADA ESTE		Escala real: 1:50	
									Escala impresión: 1:100	











**EPSEB**  
Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona

Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía

Título del proyecto:

**Modelado tridimensional de la ermita de la Salut en el municipio de el Papiol**

Proyectista: Javier Muniente Castro

Director: Felipe Bull Pozuelo

Título del plano:

**ORTOFOTOGRAFÍA CUBIERTA (PLANTA)**

Nº de plano: 5 de 6

Escala real: 1:50

Escala impresión: 1:100





<div><div></div><div>EPSEB</div><div>Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona</div></div>		Título del proyecto:		Proyectista: Javier Muniente Castro		Título del plano:	
Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía		Modelado tridimensional de la ermita de la Salut en el municipio de el Papiol		Director: Felipe Bulli Pozuelo		ORTOFOTOGRAFÍA	
						ISOMETRIAS	
						Nº de plano: 6 de 6	
						Escala real: 1:50	
						Escala impresión:1:300	

## **11. ANEXOS**



## **11.1 RESEÑAS**





# RESEÑA - PA1

Modelado tridimensional de la ermita de la Salut en el municipio de el Papiol

**Provincia:** Barcelona  
**Comarca:** *Baix Llobregat*  
**Municipio:** El Papiol  
**Descripción:**

Clavo de acero al cual se le ha insertado una diana para poder identificar el punto en las imágenes.

**Sistema de referencia:** ETRS89  
**Proyección:** UTM Huso 31 hemis. N  
**Modelo de geoide:** EGM 08D595

<b>X:</b>	418577.845 m	: 0.001 m
<b>Y:</b>	4589082.589 m	: 0.001 m
<b>K:</b>	0.99968176	
<b>H (orto.):</b>	255.427 m	: 0.002 m
<b>h (elip.):</b>	304.775 m	

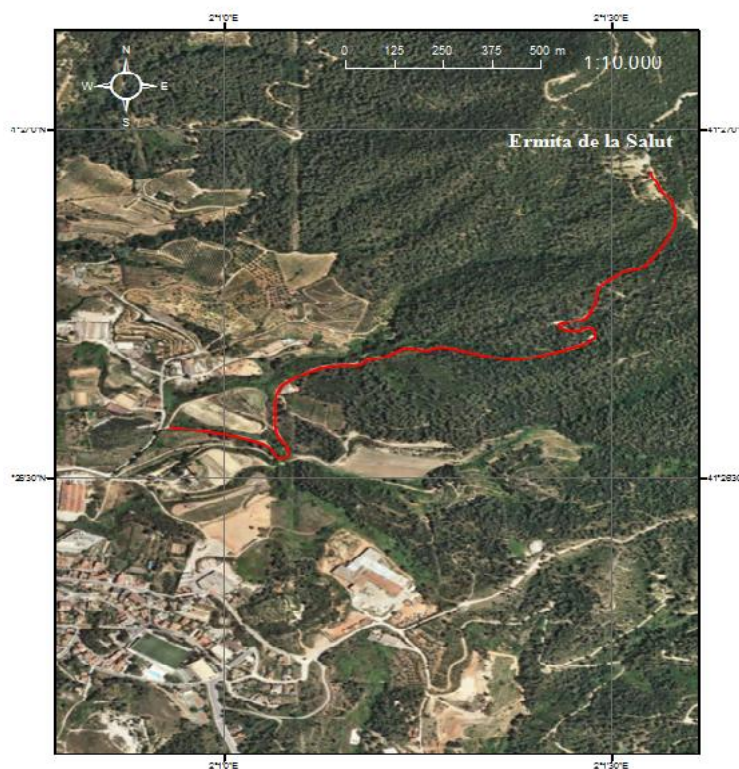
MODELO 3D



DETALLE



LOCALIZACIÓN



Junto a la cima del Puig Madrona, por el camino Can Esteve de la Font, en el cruce con coordenadas 41.442877 N, 2.015273 E (WGS84), acceder a pie por la senda (marcada en rojo).

# RESEÑA - PA2

Modelado tridimensional de la ermita de la Salut en el municipio de El Papiol

**Provincia:** Barcelona  
**Comarca:** *Baix Llobregat*  
**Municipio:** El Papiol  
**Descripción:**

Clavo de acero.

**Sistema de referencia:** ETRS89  
**Proyección:** UTM Huso 31 hemis. N  
**Modelo de geoide:** EGM 08D595

<b>X:</b>	418569.6921	: 0.008 m
<b>Y:</b>	4589086.318	: 0.008 m
<b>K:</b>	0.99968176	
<b>H (orto.):</b>	255.892	: 0.000 m
<b>h (elip.):</b>	-	

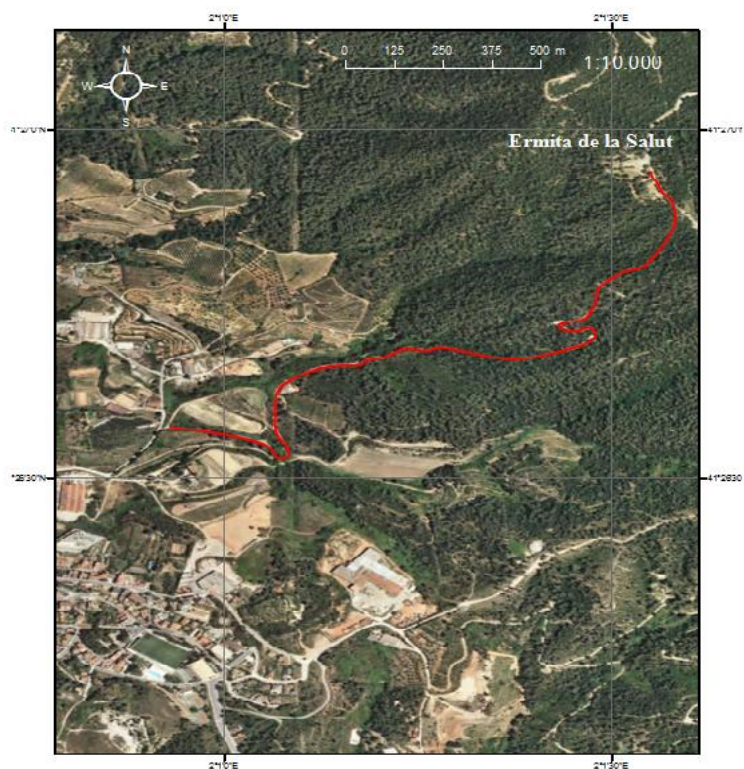
## MODELO 3D



## DETALLE



## LOCALIZACIÓN



Junto a la cima del Puig Madrona, por el camino Can Esteve de la Font, en el cruce con coordenadas 41.442877 N, 2.015273 E (WGS84), acceder a pie por la senda (marcada en rojo).



# RESEÑA - PA3

Modelado tridimensional de la ermita de la Salut en el municipio de El Papiol

**Provincia:** Barcelona  
**Comarca:** *Baix Llobregat*  
**Municipio:** El Papiol  
**Descripción:**

Clavo de acero al cual se le ha insertado una diana para poder identificar el punto en las imágenes.

**Sistema de referencia:** ETRS89  
**Proyección:** UTM Huso 31 hemis. N  
**Modelo de geoide:** EGM 08D595

<b>X:</b>	418573.594 m	: 0.009 m
<b>Y:</b>	4589094.584 m	: 0.011 m
<b>K:</b>	0.99968176	
<b>H (orto.):</b>	257.029 m	: 0.000 m
<b>h (elip.):</b>	-	

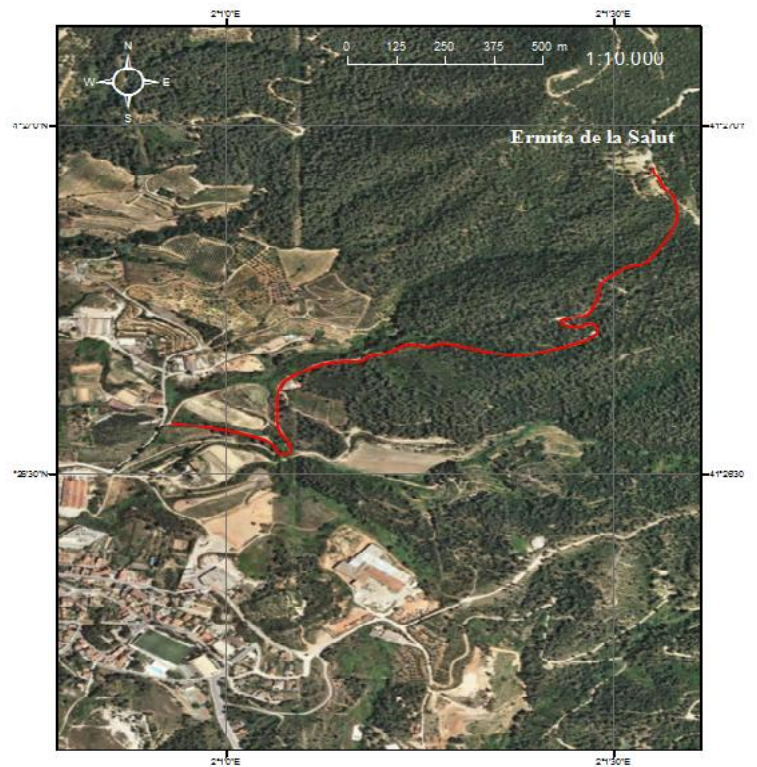
## MODELO 3D



## DETALLE



## LOCALIZACIÓN



Junto a la cima del Puig Madrona, por el camino Can Esteve de la Font, en el cruce con coordenadas 41.442877 N, 2.015273 E (WGS84), acceder a pie por la senda (marcada en rojo).

# RESEÑA - PA4

Modelado tridimensional de la ermita de la Salut en el municipio de El Papiol

**Provincia:** Barcelona  
**Comarca:** *Baix Llobregat*  
**Municipio:** El Papiol  
**Descripción:**

Clavo de acero al cual se le ha insertado una diana para poder identificar el punto en las imágenes.

**Sistema de referencia:** ETRS89  
**Proyección:** UTM Huso 31 hemis. N  
**Modelo de geoide:** EGM 08D595

<b>X:</b>	4185.95.343 m	: 0.011 m
<b>Y:</b>	4589104.548 m	: 0.008 m
<b>K:</b>	0.99968176	
<b>H (orto.):</b>	255.737 m	: 0.000 m
<b>h (elip.):</b>	-	

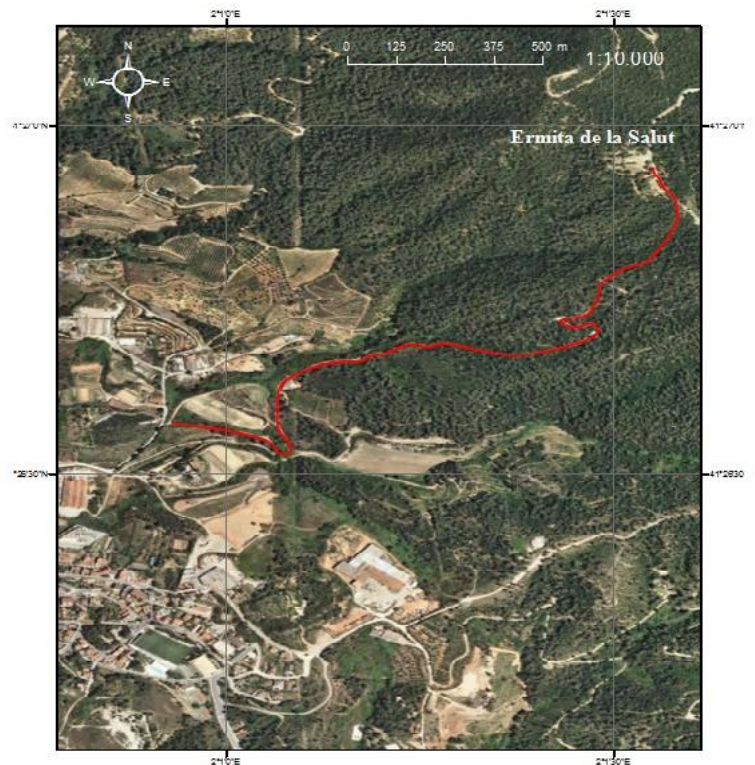
## MODELO 3D



## DETALLE



## LOCALIZACIÓN



Junto a la cima del Puig Madrona, por el camino Can Esteve de la Font, en el cruce con coordenadas 41.442877 N, 2.015273 E (WGS84), acceder a pie por la senda (marcada en rojo).



# RESEÑA - PA5

Modelado tridimensional de la ermita de la Salut en el municipio de El Papiol

**Provincia:** Barcelona  
**Comarca:** *Baix Llobregat*  
**Municipio:** El Papiol  
**Descripción:**

Clavo de acero al cual se le ha insertado una diana para poder identificar el punto en las imágenes.

**Sistema de referencia:** ETRS89  
**Proyección:** UTM Huso 31 hemis. N  
**Modelo de geoide:** EGM 08D595

<b>X:</b>	418600.527 m	: 0.001 m
<b>Y:</b>	418577.845 m	: 0.001 m
<b>K:</b>	0.99968176	
<b>H (orto.):</b>	255.312 m	: 0.002 m
<b>h (elip.):</b>	304.636 m	

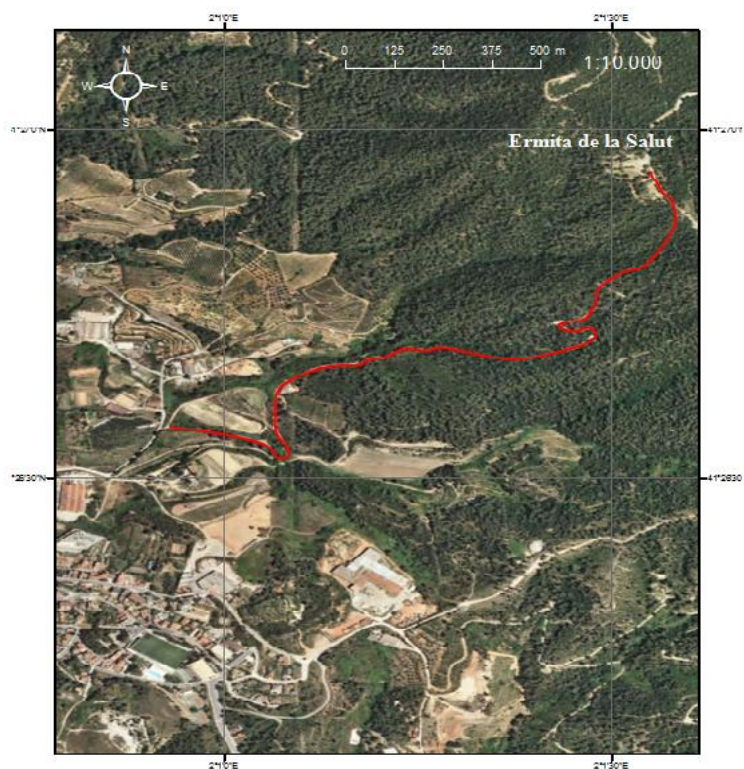
MODELO 3D



DETALLE



LOCALIZACIÓN



Junto a la cima del Puig Madrona, por el camino Can Esteve de la Font, en el cruce con coordenadas 41.442877 N, 2.015273 E (WGS84), acceder a pie por la senda (marcada en rojo).

## **11.2 INFORME DE CALIDAD DEL MODELO 3D**



# Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Discovery version 2.0.71



**Important:** Click on the different icons for:



Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections



Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

## Summary



Project	lasalut
Processed	2015-sep.-06 17:34:04
Average Ground Sampling Distance (GSD)	0.55 cm / 0.21 in
Area Covered	0.0029 km <sup>2</sup> / 0.2871 ha / 0.0011 sq. mi. / 0.7099 acres
Time for Initial Processing (without report)	07m:27s

## Quality Check



Images	median of 34884 keypoints per image	
Dataset	126 out of 126 images calibrated (100%), all images enabled	
Camera Optimization	0.1% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 14540.1 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 4 GCPs (4 3D), mean error = 0.009 m	

## Preview

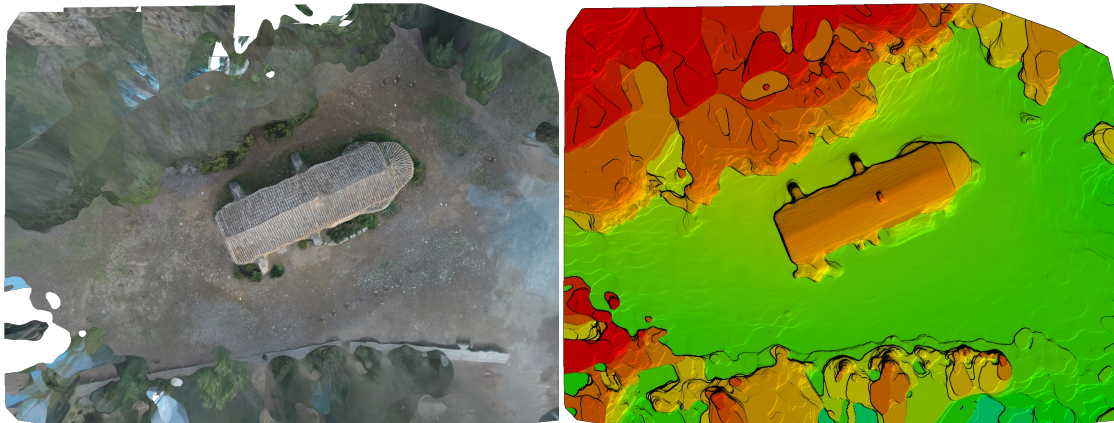


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

## Calibration Details



Number of Calibrated Images	126 out of 126
Number of Geolocated Images	0 out of 126

## Initial Image Positions



The preview is not generated for images without geolocation.



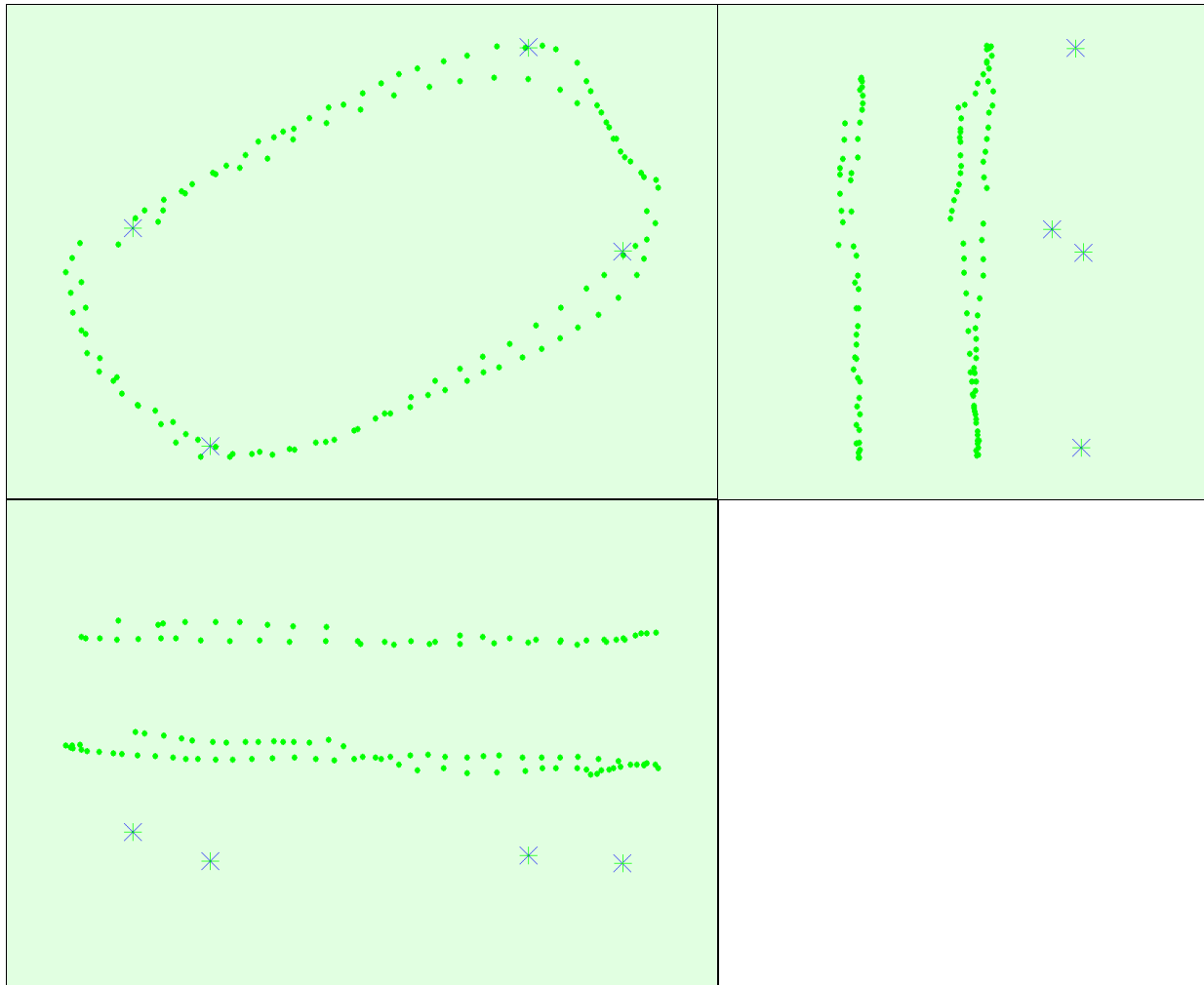


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane).

## ? Overlap

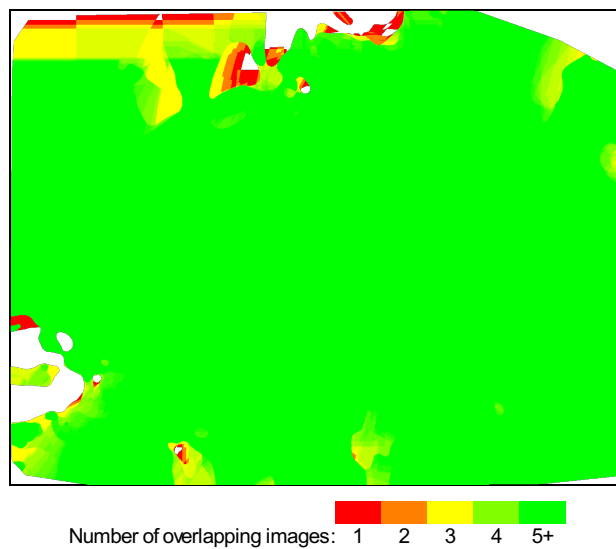


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

# Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1841827
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	638320
Mean Reprojection Error [pixels]	0.166959

## Internal Camera Parameters

**NEW\_HERO3+SilverEdition\_2.8\_3680x2760 (RGB). Sensor Dimensions: 5.704 [mm] x 4.278 [mm]**



EXIF ID: HERO3+SilverEdition\_2.8\_3680x2760

	Poly[0]	Poly[1]	Poly[2]	Poly[3]	c	d	e	f	Principal Point x	Principal Point y
Initial Values	0.000038	1.000000	-0.013432	0.155694	2536.16	0.00	0.00	2536.16	1863.47	1425.20
Optimized Values	0.000078	1.000000	-0.011399	0.154308	2533.41	0.00	0.00	2533.41	1864.10	1426.18

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. White indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

## 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	34884	14540
Mn	20967	1554
Max	41253	24361
Mean	33759	14618

## 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	408126
In 3 Images	112416
In 4 Images	47369
In 5 Images	24912
In 6 Images	15006
In 7 Images	9683
In 8 Images	6441
In 9 Images	4338
In 10 Images	2980
In 11 Images	2092
In 12 Images	1438
In 13 Images	1013
In 14 Images	668
In 15 Images	421
In 16 Images	367
In 17 Images	259
In 18 Images	178
In 19 Images	133
In 20 Images	137
In 21 Images	85
In 22 Images	60
In 23 Images	48

In 24 Images	41
In 25 Images	22
In 26 Images	21
In 27 Images	14
In 28 Images	7
In 29 Images	11
In 30 Images	11
In 31 Images	11
In 32 Images	5
In 33 Images	2
In 34 Images	3
In 36 Images	1
In 37 Images	1

## ? 3D Points from 2D Keypoint Matches

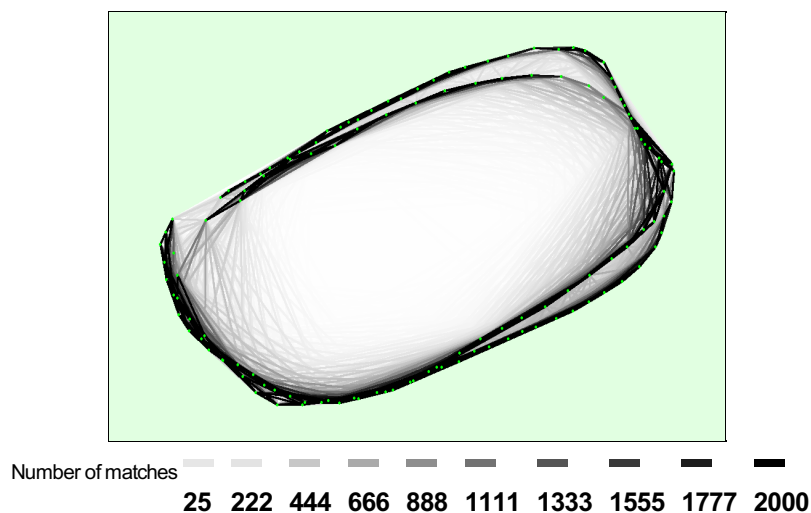


Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images.

## Geolocation Details



### ? Ground Control Points



GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
1A(3D)	0.020/ 0.020	0.015	-0.010	-0.002	0.353	17 / 17
3A(3D)	0.020/ 0.020	0.001	0.012	0.002	0.252	21 / 21
4A(3D)	0.020/ 0.020	-0.005	0.020	-0.002	0.253	19 / 19
5A(3D)	0.020/ 0.020	-0.011	-0.021	0.001	0.370	21 / 21
<b>Mean [m]</b>		-0.000005	0.000160	-0.000173		
<b>Sigma [m]</b>		0.009671	0.016300	0.001874		
<b>RMS Error [m]</b>		0.009671	0.016301	0.001882		

0 out of 59 check pointss have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
PC1	0.0200/0.0200	-0.0022	0.0037	0.0029	0.7011	16 / 16
PC2	0.0200/0.0200	0.0002	0.0044	0.0033	0.2517	11 / 11
PC3	0.0200/0.0200	0.0044	0.0027	0.0072	0.4071	14 / 14
PC4	0.0200/0.0200	-0.0039	0.0038	0.0057	0.2595	15 / 15
PC5	0.0200/0.0200	-0.0067	0.0038	0.0034	0.5871	18 / 18
PC6	0.0200/0.0200	-0.0013	0.0012	0.0027	0.0795	3 / 3
PC7	0.0200/0.0200	0.0061	0.0019	-0.0002	0.3095	6 / 6
PC8	0.0200/0.0200	-0.0039	0.0018	0.0033	0.2315	14 / 14
PC9	0.0200/0.0200	-0.0060	-0.0024	0.0035	1.0554	103 / 103

PC10	0.0200/0.0200	0.0066	0.0063	-0.0043	0.8948	81 / 82
PC11	0.0200/0.0200	-0.0083	0.0081	0.0121	1.1813	106 / 106
PC12	0.0200/0.0200	0.0279	-0.0094	-0.0027	0.4964	5 / 5
PC13	0.0200/0.0200	0.0031	0.0055	0.0023	1.1337	51 / 51
PC14	0.0200/0.0200	0.0021	-0.0010	0.0033	0.5572	2 / 2
PC15	0.0200/0.0200	-0.0059	-0.0170	-0.0029	0.8607	15 / 15
PC16	0.0200/0.0200	0.0037	0.0082	0.0040	0.4498	16 / 16
PC17	0.0200/0.0200	0.0009	-0.0033	-0.0021	0.5070	3 / 3
PC18	0.0200/0.0200	0.0071	0.0046	-0.0000	0.9763	65 / 65
PC19	0.0200/0.0200	-0.0180	-0.0069	-0.0153	1.0019	10 / 10
PC20	0.0200/0.0200	-0.0137	-0.0128	0.0015	0.4178	24 / 24
PC21	0.0200/0.0200	-0.0044	-0.0069	0.0090	0.2434	17 / 17
PC22	0.0200/0.0200	-0.0022	-0.0047	0.0032	0.8269	90 / 90
PC23	0.0200/0.0200	-0.0750	0.0148	-0.0206	1.0494	84 / 84
PC24	0.0200/0.0200	-0.0103	-0.0065	-0.0026	0.3532	9 / 9
PC25	0.0200/0.0200	0.0052	-0.0071	0.0031	0.3060	9 / 9
PC26	0.0200/0.0200	-0.0094	-0.0139	0.0045	0.7335	51 / 51
PC27	0.0200/0.0200	-0.0028	-0.0081	0.0078	0.2755	10 / 10
PC28	0.0200/0.0200	-0.0099	-0.0256	-0.0081	0.8884	98 / 98
PC29	0.0200/0.0200	-0.0147	-0.0077	-0.0013	0.0764	5 / 5
PC30	0.0200/0.0200	-0.0144	0.0021	-0.0037	0.9689	66 / 66
PC31	0.0200/0.0200	0.0008	-0.0088	0.0195	0.3527	32 / 32
PC32	0.0200/0.0200	0.0019	-0.0042	0.0234	0.4567	33 / 33
PC33	0.0200/0.0200	-0.0034	0.0070	-0.0021	0.5597	34 / 34
PC34	0.0200/0.0200	0.0051	-0.0009	0.0058	0.4399	38 / 38
PC35	0.0200/0.0200	0.0037	-0.0053	0.0039	0.9280	102 / 102
PC36	0.0200/0.0200	0.0115	-0.0138	0.0066	0.3773	53 / 53
PC37	0.0200/0.0200	0.0004	-0.0012	0.0029	0.2718	3 / 3
PC38	0.0200/0.0200	-0.0057	0.0038	0.0037	0.6522	5 / 5
PC39	0.0200/0.0200	0.0065	-0.0015	0.0053	0.3592	28 / 28
PC40	0.0200/0.0200	-0.0010	0.0098	0.0017	0.5493	27 / 27
PC41	0.0200/0.0200	-0.0032	0.0075	0.0441	1.0601	62 / 62
PC42	0.0200/0.0200	-0.0075	0.0025	-0.0082	0.1772	10 / 10
PC43	0.0200/0.0200	0.0017	-0.0027	0.0035	0.6811	54 / 54
PC44	0.0200/0.0200	0.0104	-0.0114	0.0036	0.3842	2 / 2
PC45	0.0200/0.0200	-0.0080	-0.0020	0.0025	0.6999	73 / 73
PC46	0.0200/0.0200	-0.0028	0.0013	0.0041	0.3431	32 / 32
PC47	0.0200/0.0200	-0.0002	-0.0054	0.0015	0.3678	25 / 25
PC48	0.0200/0.0200	0.0000	-0.0027	-0.0057	0.5277	16 / 16
PC49	0.0200/0.0200	0.0243	-0.0305	-0.0113	0.2242	5 / 5
PC50	0.0200/0.0200	0.0119	0.0010	-0.0057	0.9526	20 / 20
PC51	0.0200/0.0200	-0.0045	0.0062	0.0131	0.1722	4 / 4
PC52	0.0200/0.0200	0.0059	0.0098	-0.0054	0.3271	14 / 14
PC53	0.0200/0.0200	0.0001	0.0107	0.0070	0.9411	93 / 93
PC54	0.0200/0.0200	-0.0077	0.0179	0.0157	0.9793	88 / 88
PC55	0.0200/0.0200	-0.0090	-0.0015	0.0085	0.7383	30 / 30
PC56	0.0200/0.0200	0.0071	0.0162	0.0055	0.8178	22 / 22
PC57	0.0200/0.0200	0.0010	-0.0019	-0.0070	0.4785	14 / 14
PC58	0.0200/0.0200	0.0033	0.0168	0.0096	0.7574	2 / 2
PC59	0.0200/0.0200	0.0030	0.0034	-0.0021	0.2109	16 / 16
Mean [m]		-0.001696	-0.000687	0.002759		
Sigma [m]		0.012642	0.009222	0.009131		
RMS Error [m]		0.012755	0.009247	0.009539		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

GCP Name: 1A (418577.8450,4589082.5900,255.4270)		
		G0013440.JPG G0013442.JPG G0013444.JPG G0013446.JPG G0013600.JPG G0013602.JPG G0013604.JPG G0013608.JPG G0013612.JPG G0013614.JPG G0013616.JPG G0013618.JPG G0013620.JPG G0013622.JPG G0013624.JPG G0013626.JPG G0013628.JPG
GCP 1A was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.		
		G0013404.JPG G0013406.JPG G0013408.JPG G0013410.JPG G0013412.JPG G0013414.JPG

GCP Name: 3A (418573.5940,4589094.5840,257.0295)		
		
<p>G0013404.JPG G0013406.JPG G0013408.JPG G0013410.JPG G0013412.JPG G0013414.JPG G0013416.JPG G0013418.JPG G0013420.JPG G0013422.JPG G0013424.JPG G0013426.JPG G0013594.JPG G0013596.JPG G0013600.JPG G0013680.JPG G0013682.JPG G0013684.JPG G0013688.JPG G0013690.JPG G0013698.JPG</p>		
<p>GCP 3A was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.</p>		
		
<p>G0013428.JPG G0013430.JPG G0013432.JPG G0013434.JPG G0013436.JPG G0013438.JPG</p>		



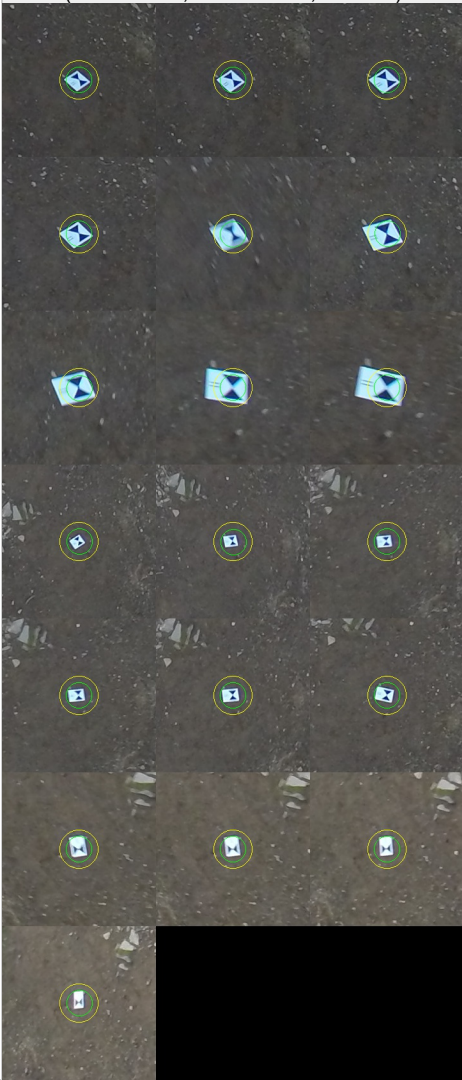

GCP Name: 4A (418595.3430,4589104.5480,255.7373)	
	G0013496.JPG G0013498.JPG G0013500.JPG G0013502.JPG G0013504.JPG G0013506.JPG G0013508.JPG G0013510.JPG G0013512.JPG G0013648.JPG G0013650.JPG G0013652.JPG G0013654.JPG G0013656.JPG G0013658.JPG G0013666.JPG G0013668.JPG G0013670.JPG G0013674.JPG
GCP 4A was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.	
	G0013404.JPG G0013406.JPG G0013408.JPG G0013410.JPG G0013412.JPG G0013414.JPG



Figure 7: Images in which GCPs have been marked (yellow circle) and in which their computed 3D points have been projected (green circle). A green circle outside of the yellow circle indicates either an accuracy issue or a GCP issue.

## Processing Options



Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-4510U CPU @ 2.00GHz RAM: 8GB GPU: Intel(R) HD Graphics Family (Driver: 10.18.10.3383)
Operating System	Windows 8.1 Pro, 64-bit
Camera Model Name	NEW_HERO3+SilverEdition_2.8_3680x2760 (RGB)
Image Coordinate System	ETRS89 / UTM zone 31N (egm2008)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	ETRS89 / UTM zone 31N (egm2008)
Output Coordinate System	ETRS89 / UTM zone 31N (egm2008)
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Free Flight or Terrestrial



Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes, Maximum Number of Triangles: 1000000, Texture Size: 8192x8192
Advanced: Matching Window Size	9x9 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Densification Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	yes
Advanced: Point Cloud Classification (beta)	yes, Minimum Object Length [m]: 0.1, Maximum Object Length [m]: 400, Minimum Object Height [m]: 0.1
Time for Point Cloud Densification	04h:43m:05s
Time for Point Cloud Classification	30m:48s
Time for 3D Textured Mesh Generation	28m:54s

Results

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	9030981
Average Density (per m <sup>3</sup> )	16197.7

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

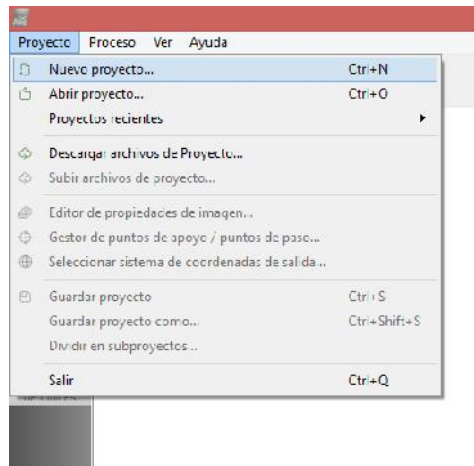
DSM and Orthomosaic Resolution	0.5 [cm/pixel]
DSM Filters	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	42m:11s
Time for Orthomosaic Generation	01h:47m:30s

### **11.3 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO CON EL SOFTWARE PIX4D MAPPER**

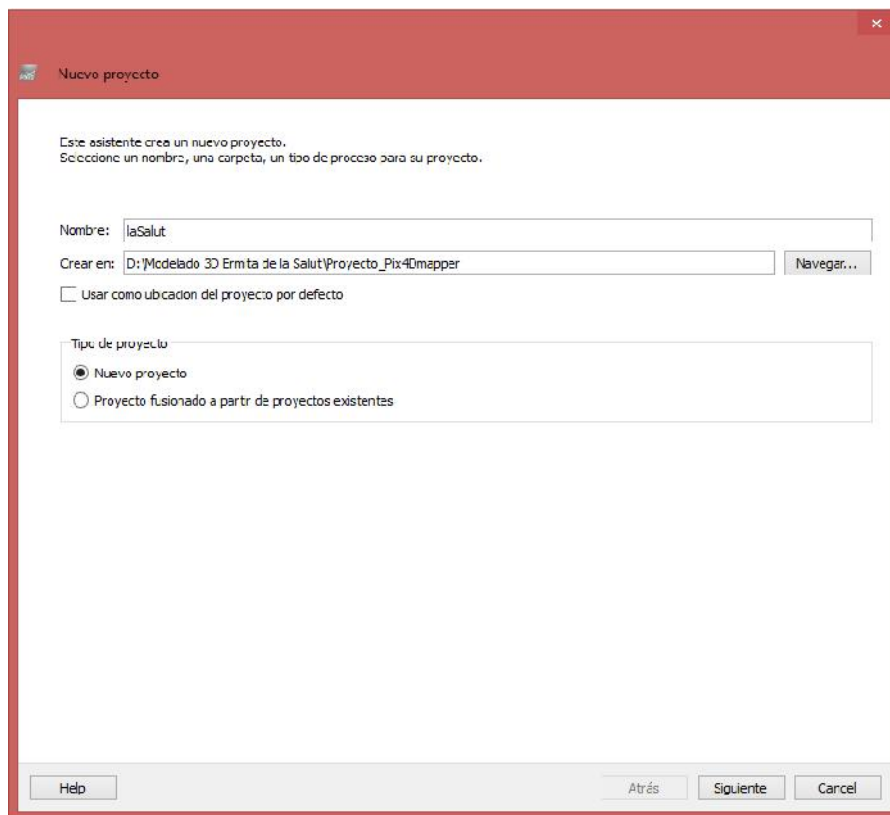


### a) Creación de un nuevo proyecto

Primeramente iniciamos Pix4Dmapper. En la barra de menús, hacemos clic en *Proyecto>Nuevo Proyecto*.

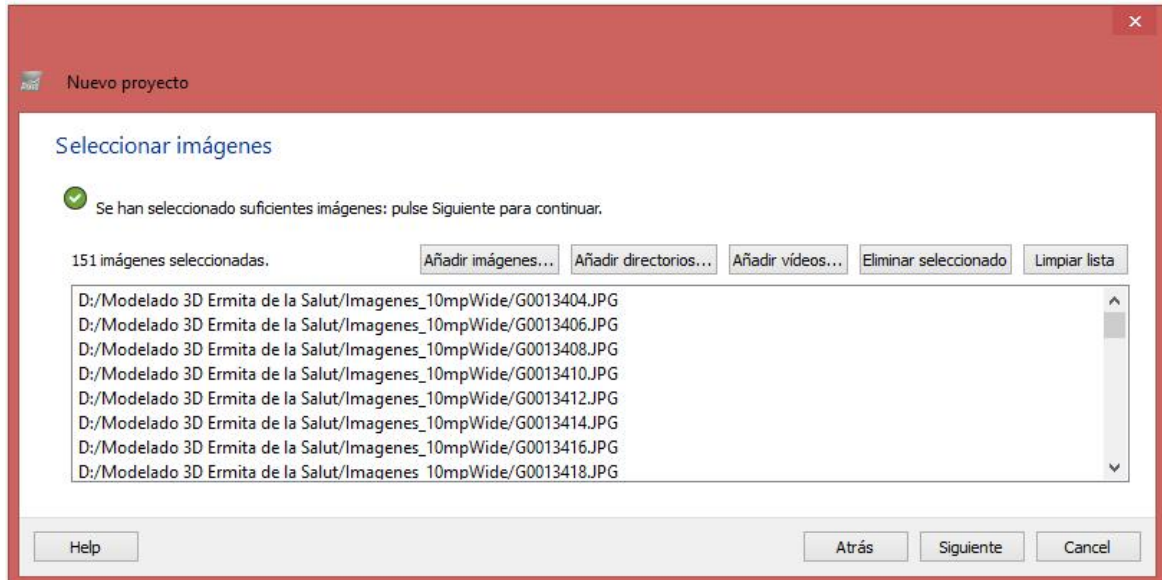


En la ventana emergente escribimos el nombre y la ruta del proyecto (sin utilizar caracteres especiales ni espacios). En tipo de proyecto seleccionamos *Nuevo Proyecto*, porque es un único proyecto que no queremos unir con ningún otro. Clicamos en siguiente.



## b) Importación de las imágenes

Clicamos en *añadir imágenes* para insertar las imágenes. Podemos seleccionar la carpeta donde se encuentran para ir más rápido.



## c) Configuración de las propiedades de la imagen

En la primera sección, seleccionamos el sistema de coordenadas que corresponde al Datum ETRS89 con proyección UTM zona 31N y altura referida al geoide EGM08.

En la segunda sección observamos el símbolo de exclamación informándonos que las imágenes no están geolocalizadas. No necesitamos saber las coordenadas de las imágenes, construiremos el modelo y posteriormente lo escalaremos insertando los puntos de apoyo.

Por último, el programa reconoce el modelo de la cámara por lo que no tenemos que hacer nada más. Esto es debido a que la información de la cámara está contenida en los metadatos de las imágenes y el programa los reconoce por el nombre de cámara en su propia base de datos.

Nuevo proyecto

### Propiedades de imagen

Image Geolocation

Sistema de coordenadas de las imágenes

✓ Datum: European Terrestrial Reference System 1989; Sistema de coordenadas: ETRS89 / UTM zone 31N (egm2008) Edit...

Geolocalización y orientación

⚠ Imágenes geolocalizadas: 0 de 151 Limpiar De EXIF De fichero... A fichero...

Precisión de geolocalización: ☒ Standard ☐ Baja ☐ Personalizada

Modelo de cámara seleccionado

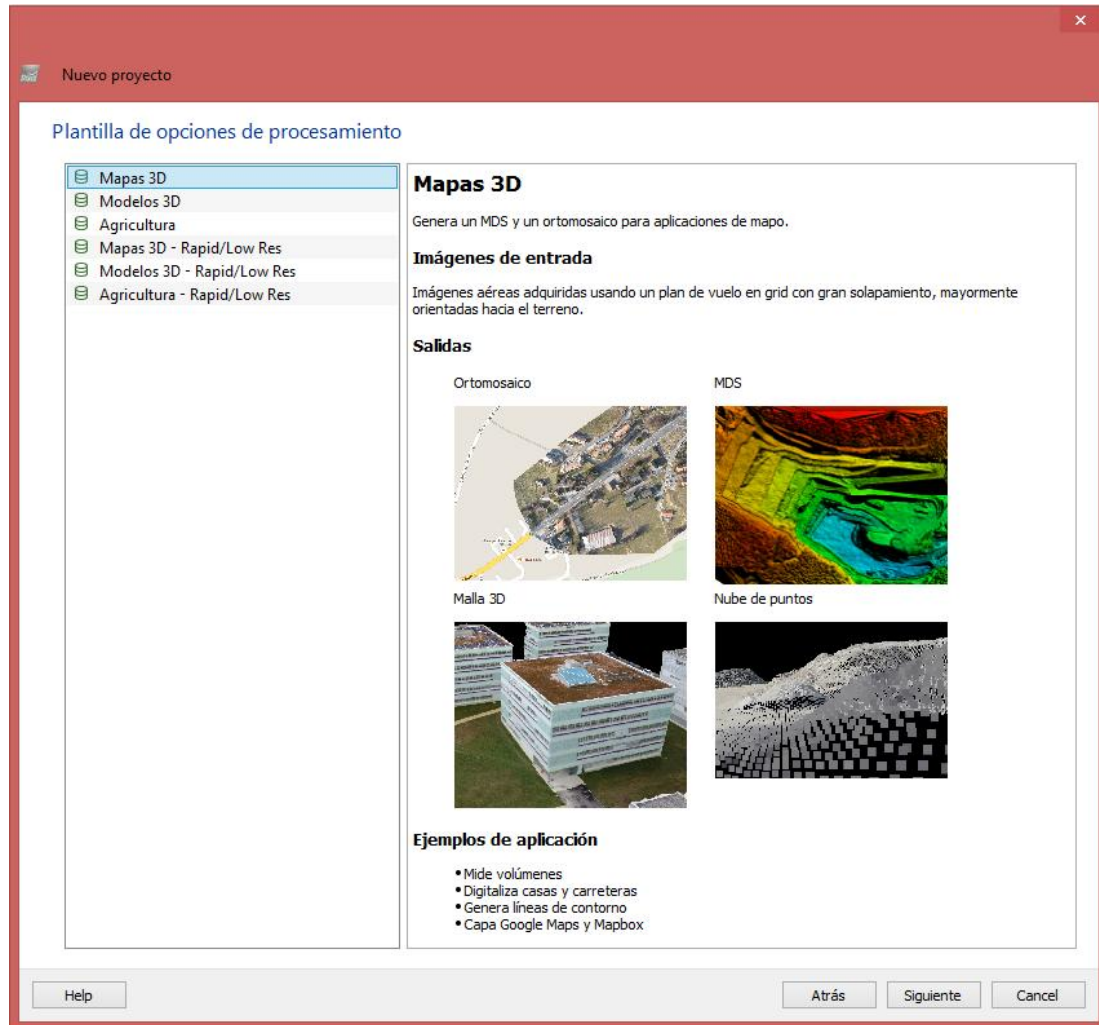
✓ HERO3+SilverEdition\_2.8\_3680x2760 (RGB) Edit...

Activada	Imagen	Grupo	X [m]	Y [m]	Z [m]	Precisión Horz [m]	Precisión Vert [m]
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013404.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013406.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013408.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013410.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013412.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013414.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013416.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013418.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013420.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000
<input checked="" type="checkbox"/>	G0013422.JPG	group1	0.000	0.000	0.000	5.000	10.000

Help Atrás Siguiente Cancel

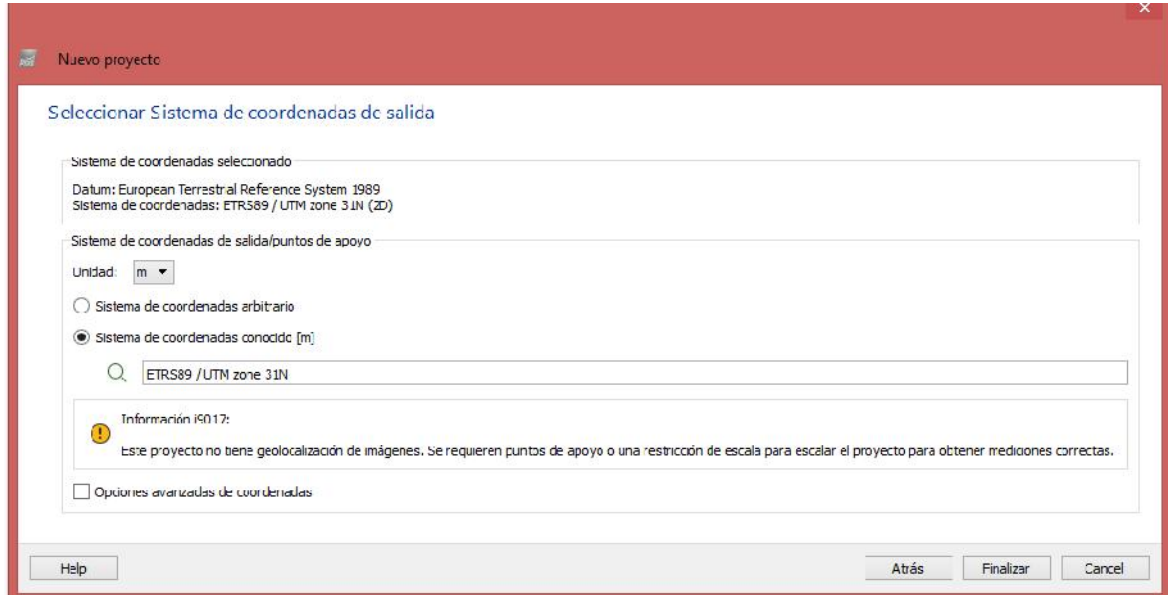
#### d) Selección de la plantilla de opciones de procesado

La plantilla más adecuada para la reconstrucción de este modelo es *Modelos 3D*, escogiendo esta plantilla no tendremos activado el modulo de generación de ortofotografías. Por lo tanto, escogeremos la plantilla *Mapas 3D*, que si permite generarlas, y posteriormente en las opciones de procesado (Anexo 3) cambiaremos la plantilla a Modelos 3D.



### e) Selección del Sistema de coordenadas de salida

En este proyecto el sistema de coordenadas es conocido por lo que elegiremos el mismo sistema de coordenadas de entrada para que no se produzca ninguna transformación.



The screenshot shows a software window titled "Nuevo proyecto" (New project). Inside, there is a section titled "Seleccionar Sistema de coordenadas de salida" (Select output coordinate system). The "Sistema de coordenadas seleccionado" (Selected coordinate system) section shows "Datum: European Terrestrial Reference System 1989" and "Sistema de coordenadas: ETRS89 / UTM zone 31N (2D)". The "Sistema de coordenadas de salida/puntos de apoyo" (Output coordinate system/support points) section has a "Unidad:" (Unit) dropdown set to "m". There are two radio button options: "Sistema de coordenadas arbitrario" (Arbitrary coordinate system) and "Sistema de coordenadas conocido [m]" (Known coordinate system [m]), with the latter being selected. Below these is a search bar containing "ETRS89 / UTM zone 31N". An information box with a yellow warning icon states: "Información ISO17: Este proyecto no tiene geolocalización de imágenes. Se requieren puntos de apoyo o una restricción de escala para escalar el proyecto para obtener mediciones correctas." (Information ISO17: This project does not have image geolocation. Support points or a scale restriction are required to scale the project to obtain correct measurements.) At the bottom left is a "Help" button, and at the bottom right are "Atrás" (Back), "Finalizar" (Finish), and "Cancel" buttons.





#### **11.4 ADICIÓN DE PUNTOS DE APOYO Y CONTROL**



Como ya se ha explicado en la memoria, para georeferenciar el modelo y mejorar la precisión global del proyecto es necesario añadir puntos de apoyo. Estos puntos pueden ser obtenidos usando métodos topográficos o mediante observaciones GNSS. También podrían obtenerse a través del servicio Web Map Service con una precisión mucho menor. Paralelamente, mediante técnicas topográficas, radiando a puntos significativos en la fachada de la ermita se obtienen los puntos de control, para verificar con que exactitud se ha construido el modelo tridimensional.

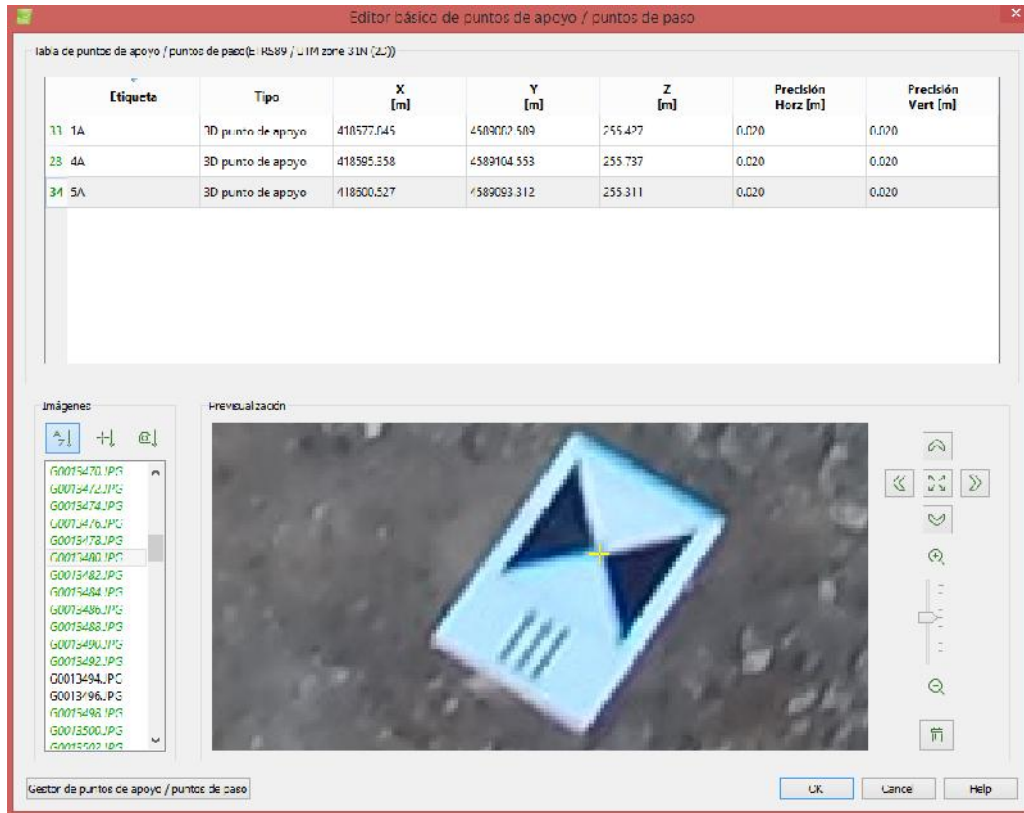
Dependiendo del sistema de coordenadas de los puntos de apoyo (conocidas o relativas) y de si tenemos las imágenes geolocalizadas utilizaremos un método u otro a la hora de agregar y marcar los puntos de apoyo.

Las imágenes no están geolocalizadas, por lo que es necesario escalar el modelo. Por otro lado, las coordenadas de los puntos de apoyo/control son conocidas.

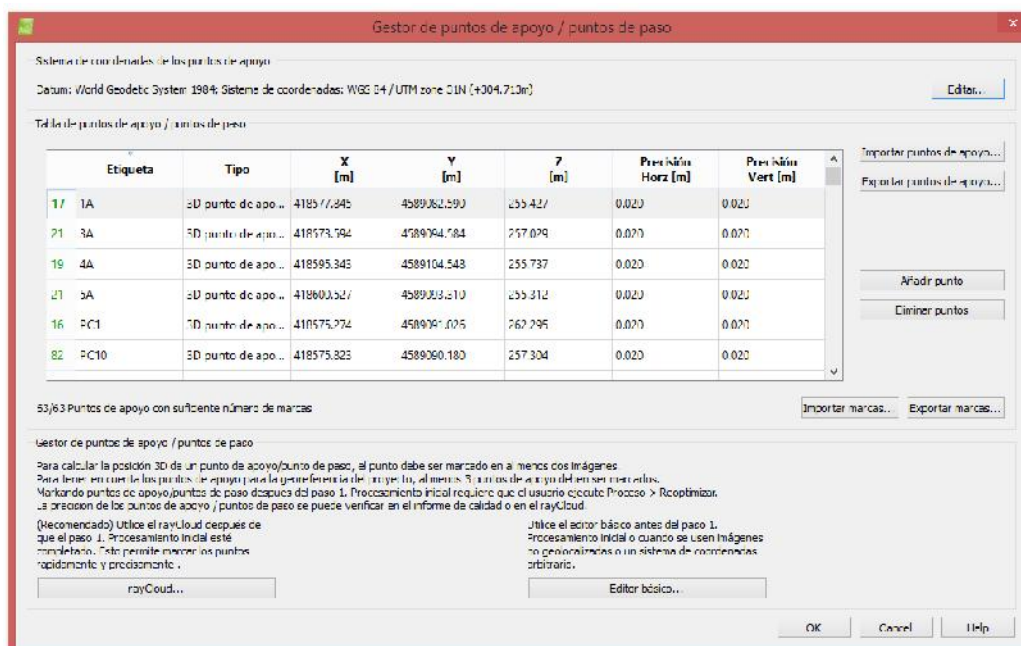
A continuación se detalla las instrucciones paso a paso sobre como incluir los puntos de apoyo/control según nuestro caso, y utilizando un método que serviría para cualquier caso. La peculiaridad de este método es que inicialmente agregamos todos los puntos manualmente y posteriormente el proceso se puede hacer sin ninguna intervención por nuestra parte.



1. Obtener los puntos de apoyo y control en el campo mediante técnicas topográficas y GNSS.
2. Añadir los puntos de apoyo y los puntos de control en *Proyecto>Gestor de puntos de apoyo/puntos de paso>Importar puntos de apoyo*.
3. Marcar los puntos en las imágenes en el mismo gestor donde los hemos importado anteriormente con el *Editor Básico*.



4. Clic en *Aceptar* para cerrar el Gestor de puntos.



## **11.5 ANÁLISIS DEL INFORME DE CALIDAD**















### a) Resumen

En el resumen aparece el nombre del proyecto, la fecha y hora de procesamiento, la distancia media de muestreo de las imágenes iniciales, la zona en planta abarcada por el proyecto y el tiempo de procesamiento inicial sin tener en cuenta el tiempo necesario para la generación del informe de calidad.

Project	lasalut
Processed	2015-sep.-06 17:34:04
Average Ground Sampling Distance (GSD)	0.55 cm / 0.21 in
Area Covered	0.0029 km <sup>2</sup> / 0.2871 ha / 0.0011 sq. mi. / 0.7099 acres
Time for Initial Processing (without report)	07m.27s

### b) Control de calidad

 Images	median of 34884 keypoints per image	
 Dataset	126 out of 126 images calibrated (100%), all images enabled	
 Camera Optimization	0.1% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 14540.1 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 4 GCPs (4 3D), mean error = 0.009 m	

- **Imágenes.** Se han identificado 34884 puntos de paso por imagen, suficientes para correlar las imágenes entre sí.
- **Conjunto de datos.** Todas las imágenes han sido calibradas en un solo bloque.
- **Optimización de la cámara.** Aquí aparece el símbolo de exclamación amarillo. Esto significa que habiendo utilizado la ultra-gra-angular, el porcentaje entre transformación afín inicial y optimizada supera el 5%.

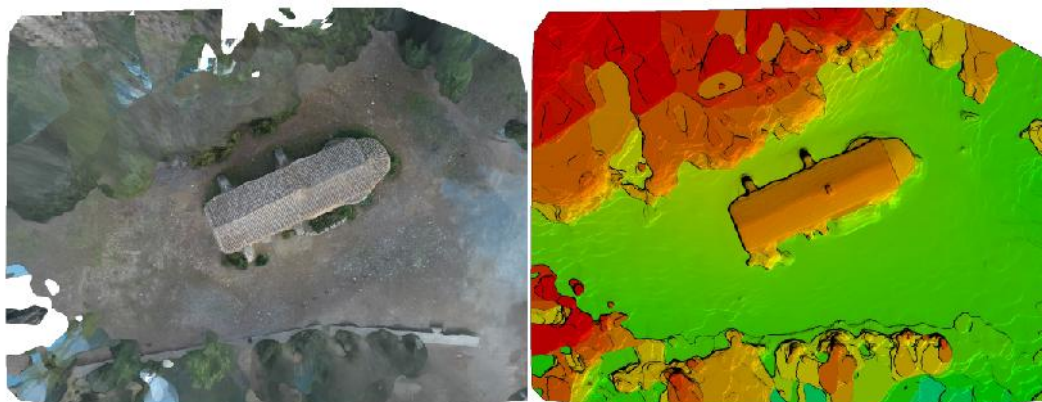
Para eliminar este error podemos cambiar los valores iniciales de la cámara a los valores optimizados:

1. En la barra de menú, hacer clic en *Proyecto>Editor de propiedades de imagen...*
2. En la sección Modelo de la cámara, clicar en *Editar*.
3. En la sección Modelo de la cámara, clicar en *Nuevo*.
4. Insertar un nuevo nombre para diferenciar del modelo origen.
5. En los parámetros del modelo de la cámara, hacer clic en *Cargar parámetros optimizados*.

- **Emparejamiento.** Representa la media de puntos emparejados por imagen. Los resultados son susceptibles de ser de alta calidad, con una media de 14540 emparejamientos por imagen calibrada.
- **Georeferenciación.** Aparece el símbolo de exclamación amarillo porque supera la media de error con 9 milímetros. Lo damos por bueno.

### c) Vista previa

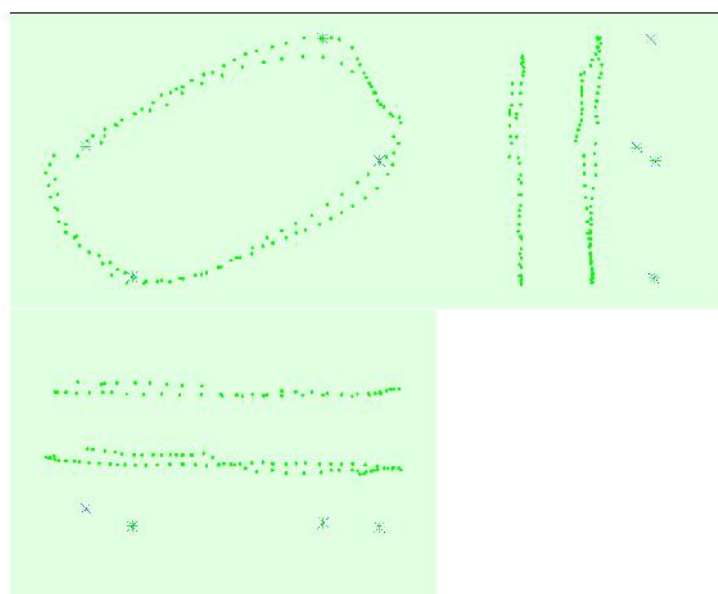
Las imágenes que aparecen son de baja resolución. Permiten una inspección visual de la calidad de la calibración inicial. Corresponden a una ortofotografía así como a un modelo digital de la superficie donde se aprecian las alturas.



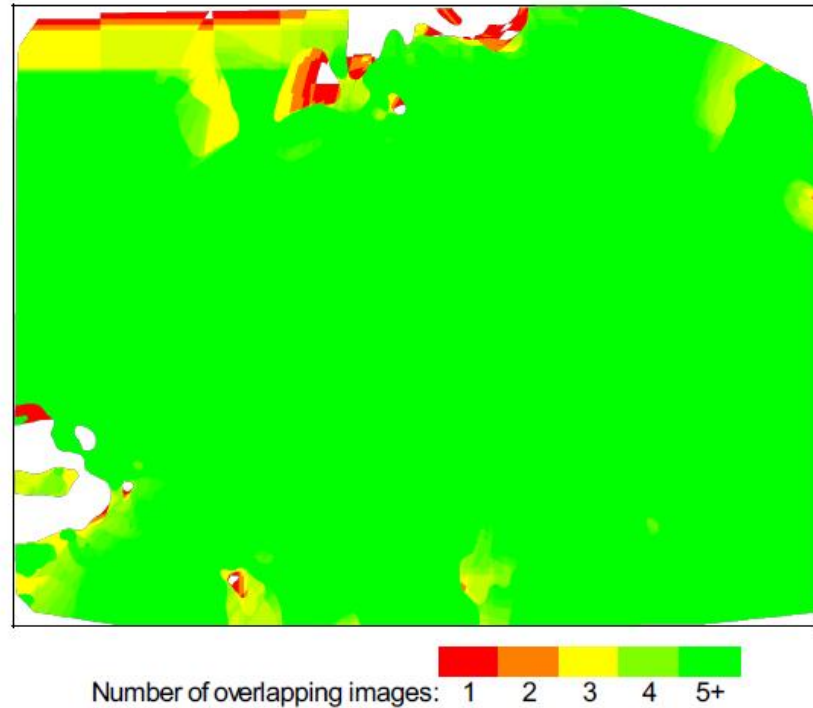
### d) Detalles de la calibración

Number of Calibrated Images	126 out of 126
Number of Geolocated Images	0 out of 126

- **Posición inicial de las imágenes.** No es generado ya que las imágenes no están georeferenciadas.
- **Puntos de control y imágenes computarizadas.** Este grafico muestra la diferencia entre las posición inicial y calculada de las imágenes, así como la diferencia entre los puntos de control.



- **Recubrimiento.** Este gráfico muestra el numero de imágenes superpuestas para cada pixel de la ortofotografía. Siendo dominante el color verde, cada píxel debe ser visible en más de 5 imágenes.



#### e) Detalles del ajuste en bloque

En el cuadro resumen aparece el número de puntos de paso automáticos en todas las imágenes que se han utilizado para el ajuste en bloque, el número de puntos 3D generados haciendo coincidir los puntos en 2D en las imágenes iniciales y el promedio del error de re-proyección en píxeles.

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1841827
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	638320
Mean Reprojection Error [pixels]	0.166959

- **Parámetros intrínsecos.** Hay que tener en cuenta que el punto principal debe estar alrededor de la mitad de la resolución de la cámara. Los valores optimizados para los parámetros de transformación afín  $c$  y  $f$  deben estar cerca el uno al otro. Los valores óptimos para los parámetros de transformación afines  $d$  y  $e$  deben estar cerca de 0. Si no fuera así, pueden haber distorsiones globales.

 **NEW\_HERO3+SilverEdition\_2.8\_3680x2760 (RGB).** Sensor Dimensions: 5.704 [mm] x 4.278 [mm]



EXIF ID: HERO3+SilverEdition\_2.8\_3680x2760

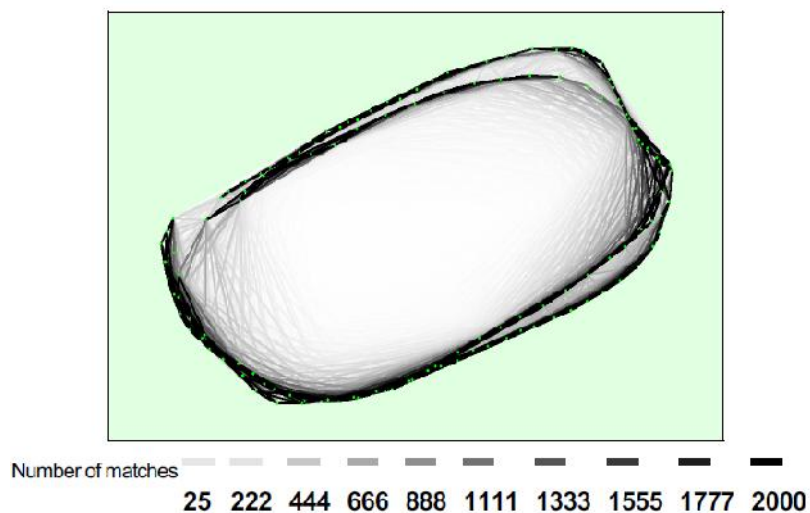
	Poly[0]	Poly[1]	Poly[2]	Poly[3]	c	d	e	f	Principal Point x	Principal Point y
Initial Values	0.000038	1.000000	-0.013432	0.155694	2536.16	0.00	0.00	2536.16	1863.47	1425.20
Optimized Values	0.000078	1.000000	-0.011399	0.154308	2533.41	0.00	0.00	2533.41	1864.10	1426.18

- **Tabla puntos de enlace 2D.** Esta tabla da una visión general del número promedio de puntos de enlace, es decir, los puntos de homólogos de las imágenes que pueden ser fácilmente reconocidos por el algoritmo SIFT integrado en el proceso. El número variará dependiendo del tamaño de las imágenes y el contenido visual.

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	34884	14540
Min	20967	1554
Max	41253	24361
Mean	33759	14618

- **Puntos 3D calculados.** Los puntos de enlace emparejados son proyectados formando así los puntos 3D. Puntos 3D generados por 2-3 imágenes son menos precisos que los puntos 3D generados a partir de un mayor número de imágenes.

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	408126
In 3 Images	112416
In 4 Images	47369
In 5 Images	24912
In 6 Images	15006
In 7 Images	9683
In 8 Images	6441
In 9 Images	4338
In 10 Images	2980
In 11 Images	2092
In 12 Images	1438
In 13 Images	1013
In 14 Images	668
In 15 Images	421
In 16 Images	367
In 17 Images	259
In 18 Images	178
In 19 Images	133
In 20 Images	137
In 21 Images	85
In 22 Images	60
In 23 Images	48



## **11.6 CONFIGURACIÓN DE LAS OPCIONES DEL PROCESADO**



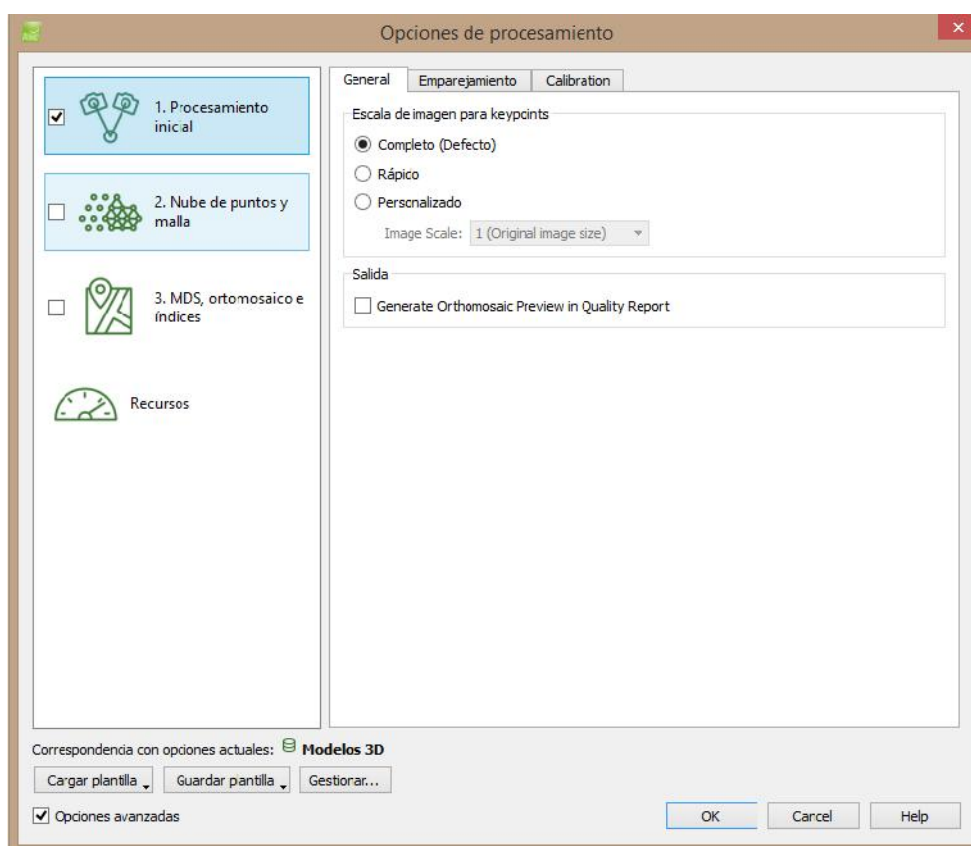


Hemos comentado en el Anexo 1 que hay que cambiar la plantilla para el procesado. Para ello, vamos a la pestaña de *Proceso > Opciones* y abajo a la izquierda de la nueva ventana, clicamos en *Cargar plantilla* para escoger *Modelos 3D*.

Las opciones vienen configuradas por defecto según la plantilla cargada. Igualmente echaremos un vistazo para ver si podemos modificar algún parámetro. Clicaremos en *Opciones avanzadas* para poder desplegar dos pestañas nuevas en cada uno de los procesos.

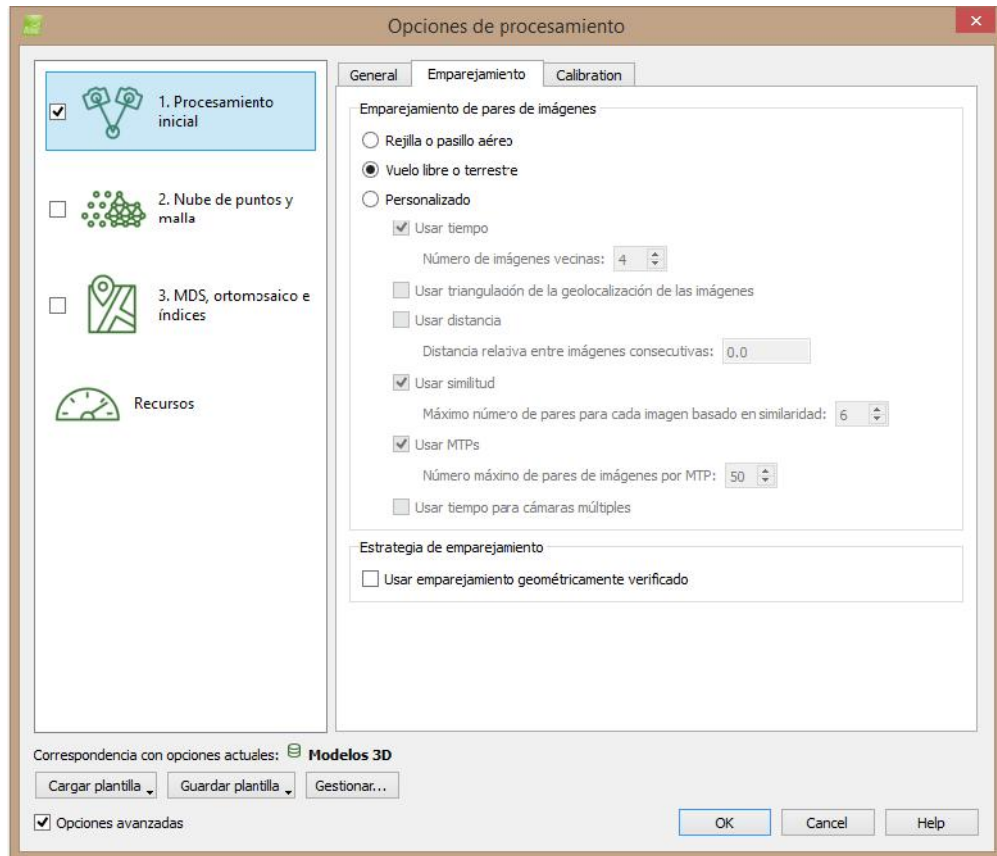
## f) Procesamiento inicial

### General



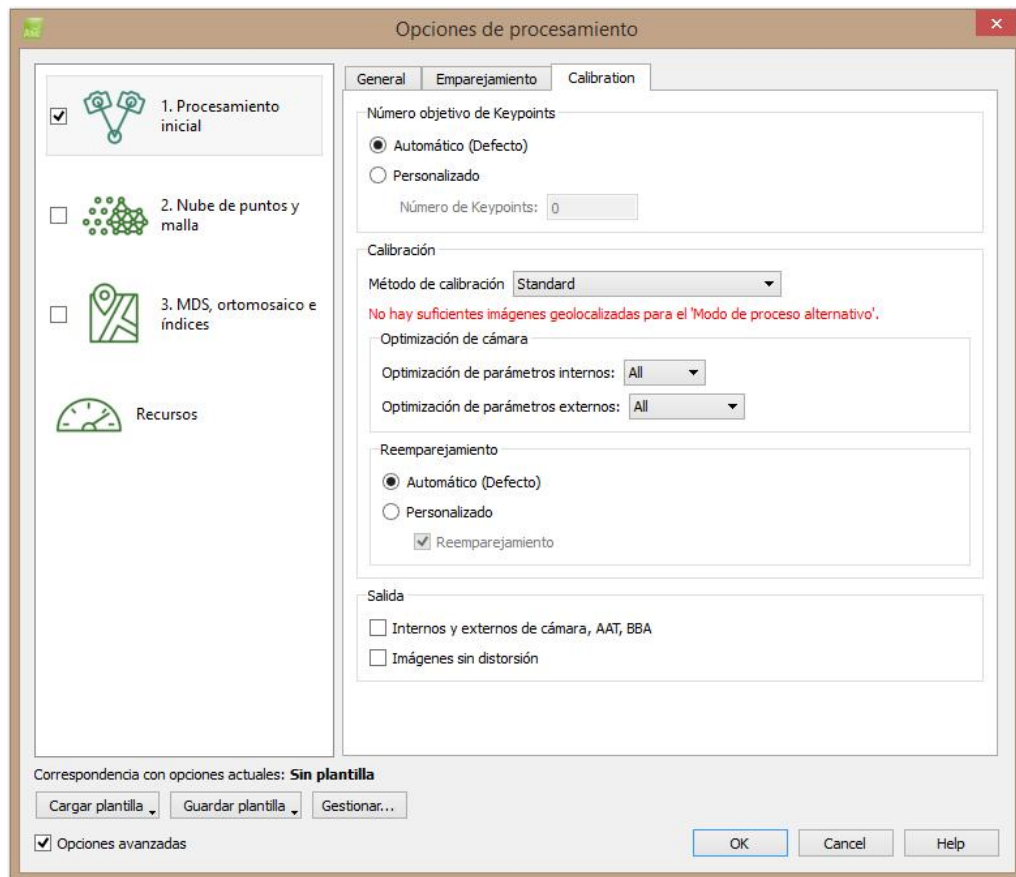
- **Escala de imagen para puntos de enlace.** Permite configurar la forma en que los puntos de enlace se extraen. La mejor opción para este proyecto es *Completo*. Tenemos la opción de seleccionar una escala inferior (1/ 2, 1/4, 1/8) utilizada en proyectos de alto solapamiento en que se extrae menos información y la precisión se ve ligeramente reducida.
- **Salida.** En caso de querer ver una vista previa de la ortofoto, en el informe de calidad seleccionamos esta opción.

## Emparejamiento



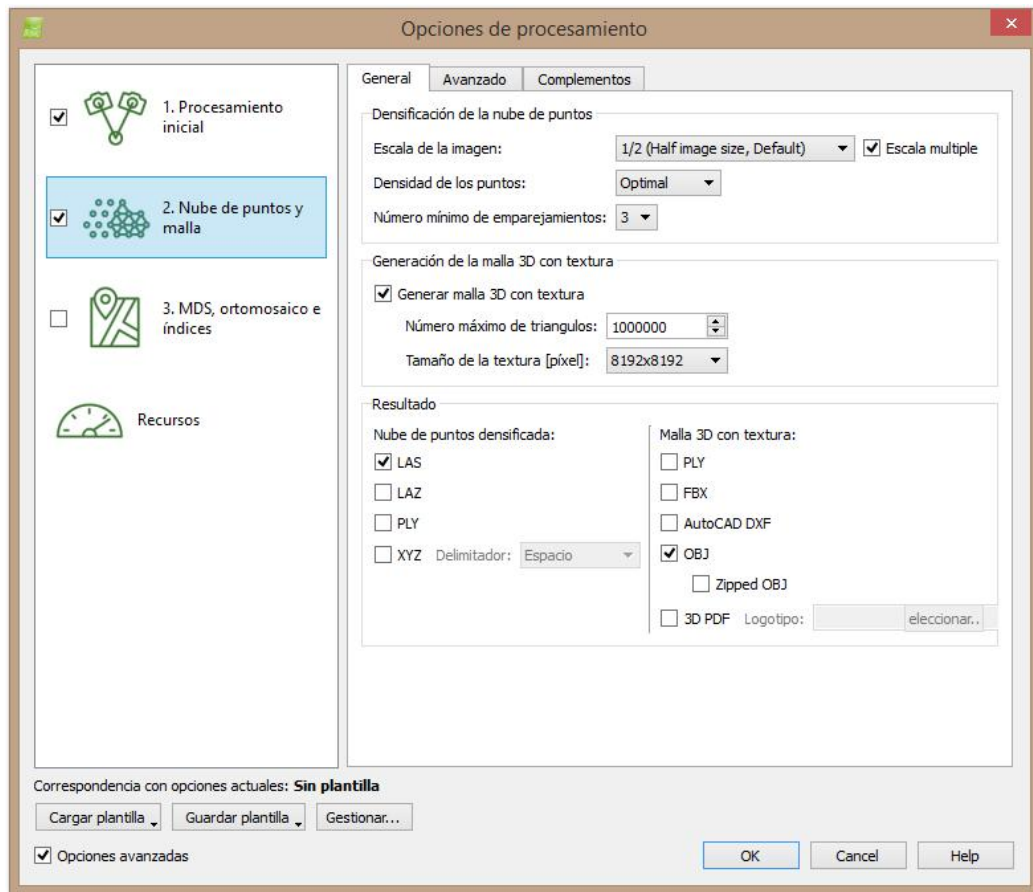
- **Emparejamiento de pares de imágenes.** La opción escogida para nuestro proyecto es *Vuelo libre o Terrestre*. Se tiene en cuenta el tiempo, es decir, el orden en que han sido tomadas las imágenes, utilizando 4 imágenes vecinas. También usaremos la similitud entre 6 máximos de pares para cada imagen y 50 pares coincidentes emparejados a través de un punto de paso MTP.

## Calibración



- **Número objetivo de Keypoints.** Permite configurar la forma en que los puntos de enlace se extraen, dejaremos la opción *Automática* para no restringir el número de enlace.
- **Calibración.** Permite seleccionar como se reconstruyen los parámetros externos y internos de la cámara. El paso de optimización consiste en la gestión de *Automatic Aerial Triangulation* (AAT), *Bundle Block Adjustment* (BBA), y un bucle de auto calibración hasta que llega a la reconstrucción óptima. Al no tener geolocalizadas las imágenes no tenemos otra opción más que la *Standard*, optimizando todos los parámetros, tanto internos (parámetros del modelo de la cámara) como externos (posición y orientación de las cámaras). El procedimiento de optimización comienza a partir de valores iniciales con el fin de calcular los valores optimizados.
- **Reemparejamiento.** Permite añadir más emparejamientos después del procesado inicial, mejorando la calidad de reconstrucción. En modo *Automático* permite volver a emparejar siempre y cuando el proyecto tenga menos de 500 imágenes.
- **Salida.** Seleccionamos *Internos y externos de cámara, AAT, BBA* para guardar los resultados y también *Imágenes sin distorsión* para generar una copia de cada imagen original utilizando los parámetros optimizados.

## g) Nube de puntos y malla

General

- **Densificación de la nube de puntos.** En primer lugar escalamos la imagen, definiendo la escala de la imagen en la que se calculan los puntos 3D adicionales. Nosotros lo dejamos en el *tamaño* de imagen recomendado, el *medio*, con la casilla *escala múltiple* marcada. Decir que, contra menor sea el tamaño escogido, menos puntos se calculan, aunque es beneficioso en imágenes con áreas de vegetación u otras con valor de pixel semejante. Y con la escala múltiple conseguimos que los puntos 3D adicionales se calculen en el resto de escalas, comenzando con la escala elegida.

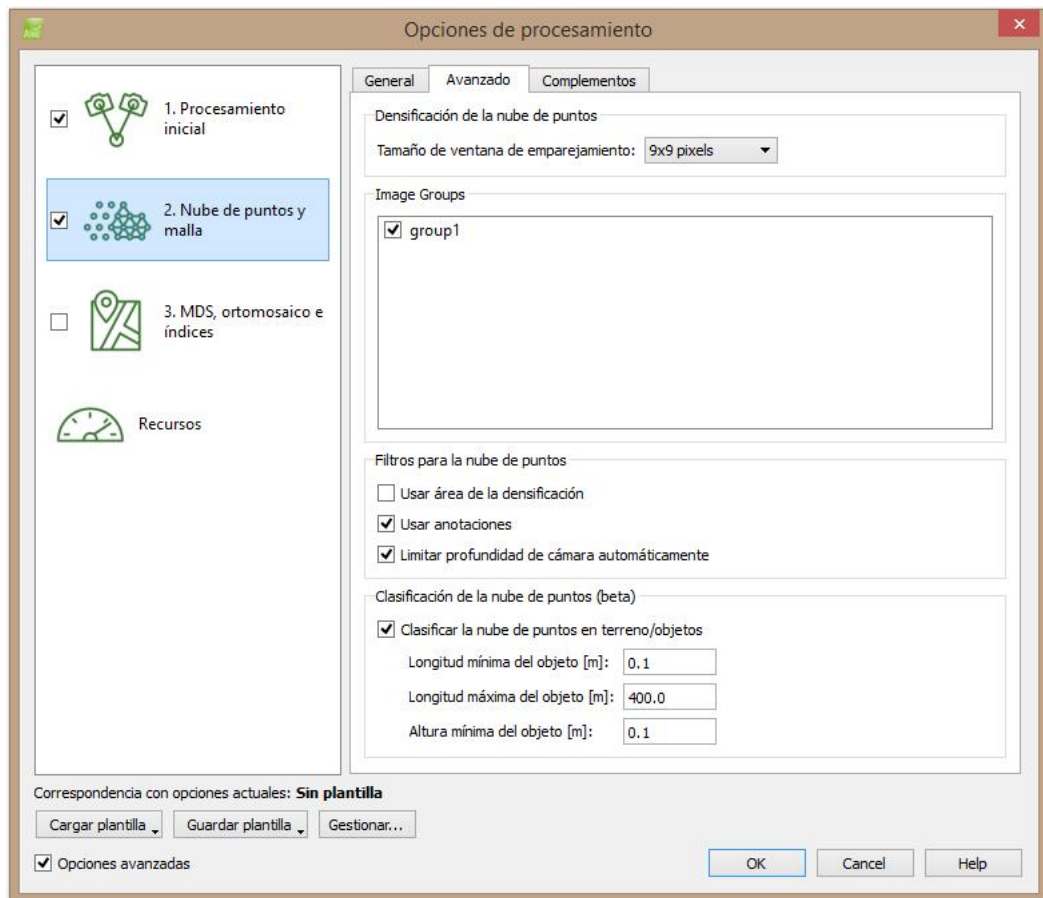
En segundo lugar, escogemos la opción *Optimal* en densidad de puntos. De esta manera calculamos un punto 3D cada  $4 / \text{escala de la imagen}$ , es decir, cada 8 píxeles.

Por último escogemos el número mínimo de emparejamientos, cada 3. Esto representa que un punto 3D tiene que ser correctamente re proyectado en al menos 3 imágenes.

- **Generación de la malla 3D con textura.** La nube de puntos densificada se utiliza para generar una superficie compuesta por triángulos. Los vértices de los triángulos no son necesariamente un punto exacto de la nube. Dado que el modelo basado en triángulos es 3D, se desdobra en un plano 2D con el fin de definir la resolución (tamaño del pixel) y que parte de cada triángulo representan, a continuación, la posición 3D del pixel se re proyecta en las imágenes originales para obtener el color.

Dicho esto, el número máximo de triángulos y el tamaño de la textura lo dejaremos por defecto, 1 millón y 8192x8192. Saber que contra mayor numero de triángulos mejor definiremos la geometría del modelo y contra mayor sea la textura aumentara la resolución.

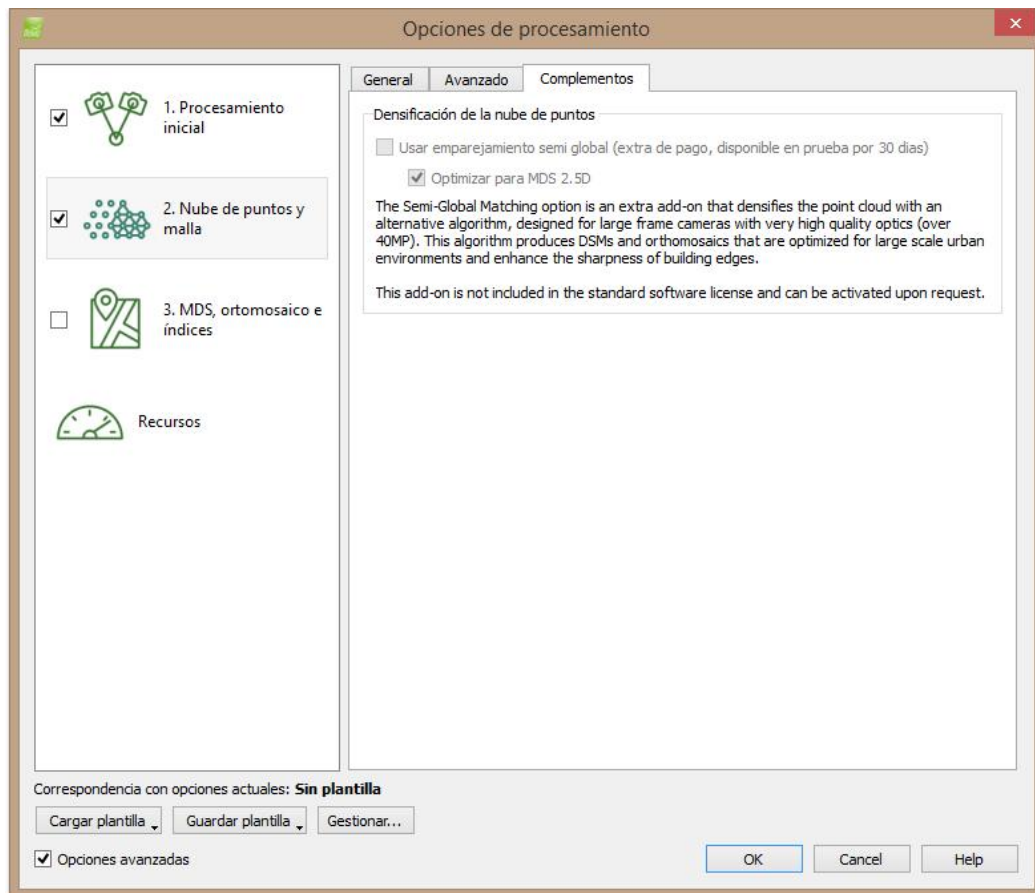
- **Resultado.** Permite seleccionar los formatos de salida deseados para la nube de puntos densificada y la malla 3D con textura. Escogeremos la extensión *LAS* para uno y *OBJ* y *PDF* para el otro.

**Avanzado**

- **Densificación de la nube de puntos.** Definimos el tamaño de ventana de emparejamiento en *9x9 píxeles*, encontrando una posición más precisa de los puntos densificados en las imágenes originales. Sugerido al usar imágenes oblicuas.
- **Grupo de imágenes.** Permite generar una nube de puntos densificada por grupos de imágenes.
- **Filtros para la nube de puntos.** En este proyecto no escogemos una área para la densificación. Es útil para otro tipo de proyectos, en los que tenemos grandes superficies, con otro tipo de plan de vuelo y imágenes nadirales. En cambio, sí que usamos anotaciones para desechar los píxeles azules que representan el cielo y también limitamos la profundidad de cámara automáticamente para no reconstruir los objetos de fondo, útil en proyectos con imágenes oblicuas.
- **Clasificación de la nube de puntos (beta).** Escogemos esta opción con los parámetros predeterminados. Es útil para generar un MDT ya que separa la nube en dos grupos de puntos, los objeto y terreno. Si no acaba de definir bien las dos nubes podemos pasar puntos de una nube a otra manualmente para rematar el trabajo.



## Complementos



- **Densificación de la nube de puntos.** Esta característica es de pago y utiliza un algoritmo de coincidencia semi-global para la densificación, útil para imágenes con textura uniforme.